

ANALIZA STABILITĂȚII ELASTICE

Aplicație rezolvată utilizând programul de calcul LUSAS

Autor: prof. dr. Ing. Iordan PETRESCU



ANALIZA STABILITĂȚII ELASTICE

Structură plană alcătuită din grinzi și bare (elemente 1D)

Descrierea structurii

Structura de analizat este o structură plană (2D) alcătuită din elemente de grindă, încărcată cu un sistem de forțe distribuite. Geometria structurii și ipoteza de încărcare considerată sunt prezentate în Figura 1.

Toate elementele structurii sunt confecționate din beton armat.

Unitățile de măsură pentru forțe și lungimi sunt: kN și m.

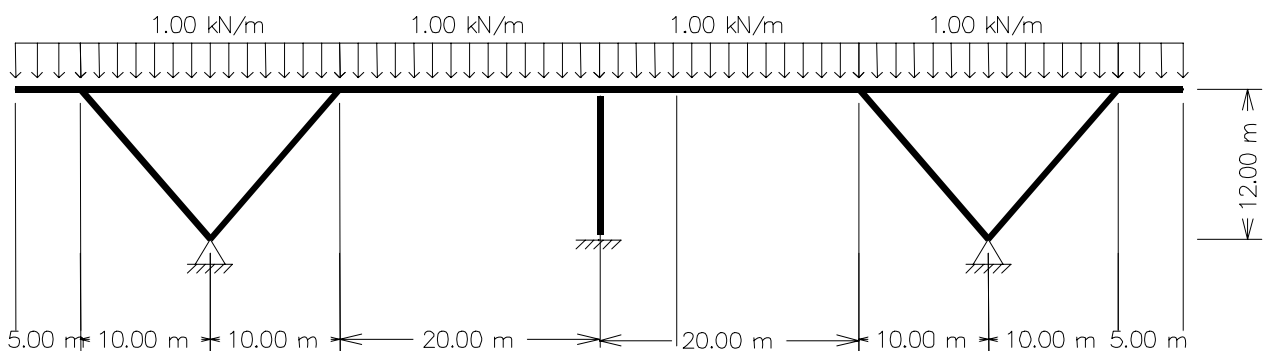


Figura 1.

Caracteristicile materialului din care este realizată structura sunt următoarele: modulul de elasticitate longitudinal $E = 40 \cdot 10^6 \text{ kN/m}^2$, coeficientul lui Poisson 0,2 și densitatea de masă $2,40 \text{ t/m}^3$.

Caracteristicile geometrice ale secțiunilor transversale ale elementelor structurii sunt prezentate în Figurile 2, 3, și 4

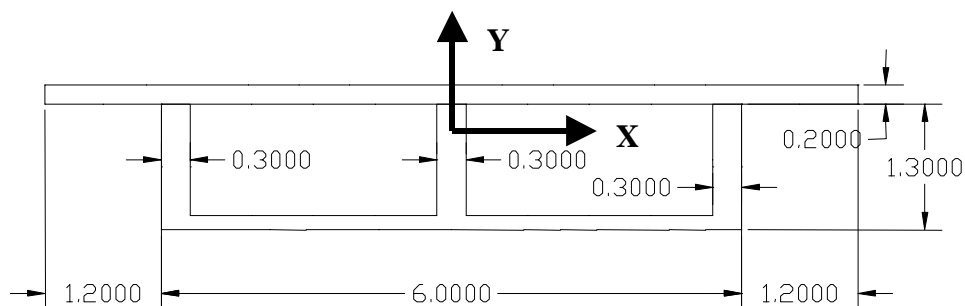


Figura 2. – Secțiune tablier

$$A = 3,615 \text{ m}^2$$

$$I_x = 1,165 \text{ m}^4 \text{ - axa de încovoiere}$$

$$I_y = 18,1567 \text{ m}^4$$

$$J = 3,131 \text{ m}^4 \text{ - moment de inerție la torsiune}$$

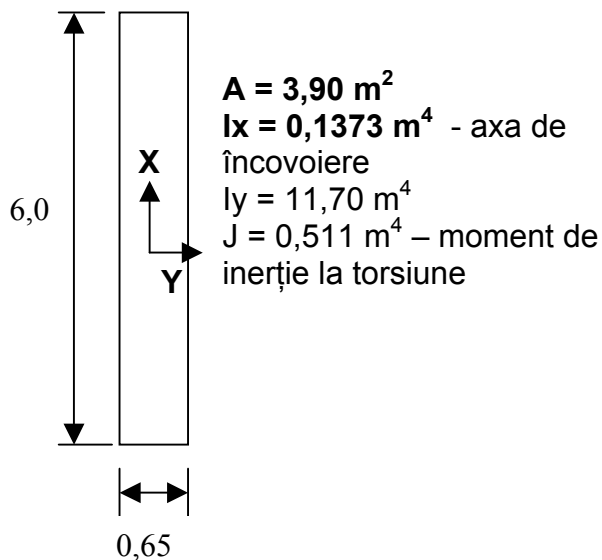


Figura 3. – Secțiune stâlp vertical

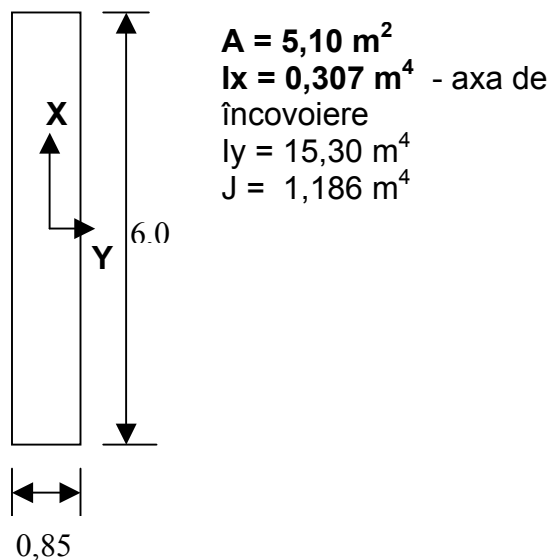


Figura 4. – Secțiune stâlp înclinat

Obiectivele analizei

Ca urmare a analizei structurii se solicită:

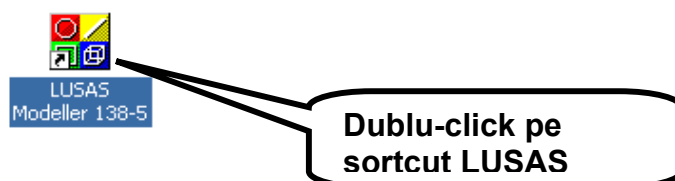
1. Determinarea valorii încărcării uniform distribuită pentru care structura își pierde stabilitatea echilibrului elastic,
2. Forma deformată de pierdere a stabilității,

Determinarea valorii încărcării critice și a formei deformată corespunzătoare se va face prin o analiză de tip flambaj prin bifurcare, utilizând programul de calcul **LUSAS**. Acesta este un program general de analiză a răspunsului structurilor plane sau spațiale modelate cu elemente finite. Solicitățile structurii pot fi aplicate static sau dinamic, iar răspunsul structurii poate fi de tip liniar sau neliniar.

În cadrul prezentei analize se va considera structura încărcată static cu o forță uniform distribuită pe elementele tablierului a cărei valoare inițială este 1,00 kN/m. Pentru determinarea valorii încărcării critice de pierdere a stabilității structurii se consideră că încărcarea inițială crește permanent până la atingerea valorii critice, când structura trece într-o poziție de echilibru deformată. Stabilirea valorii încărcării critice și a poziției deformată corespunzătoare se realizează prin o analiză de valori și vectori proprii cu ajutorul programului LUSAS.

Apelarea programului LUSAS

Programul de calcul LUSAS poate fi activat cu ajutorul butonului din stânga al mouse-ului prin dublu-click pe icoana sortcut al programului:



Ca urmare a acestei comenzi se deschide interfața de lucru a programului pregătită pentru o nouă sesiune de lucru sau pentru a deschide un model existent– Figura 5.

În continuare se va genera un model de calcul nou prin selectarea opțiunii **Create New Model** urmată de click pe butonul **OK**. Dacă se dorește deschiderea unui model existent se selectează opțiunea **Open Existing File**, urmată de identificarea numelui fișierului (extensie .mdl) atribuit modelului și click pe **O.K.**

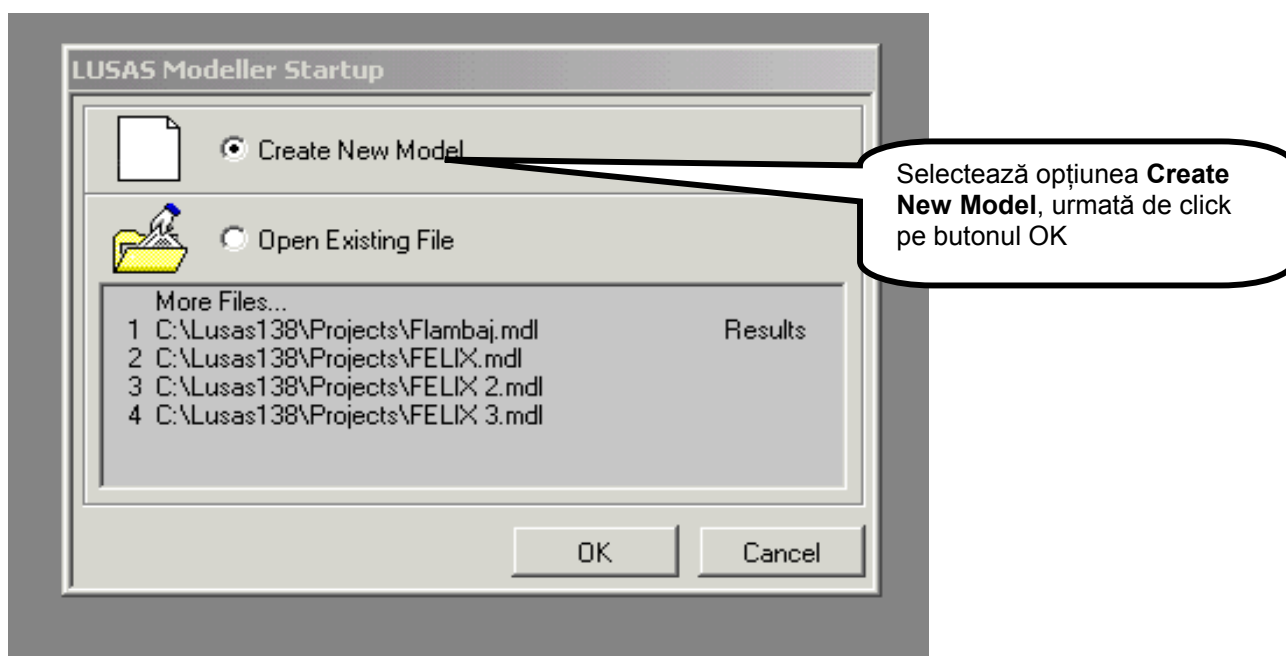


Figura 5.

Prin apelarea procedurii de **Creare a unui nou model**, pe ecran apare o casetă de dialog care se completează cu următoarele informații (Figura 6.):

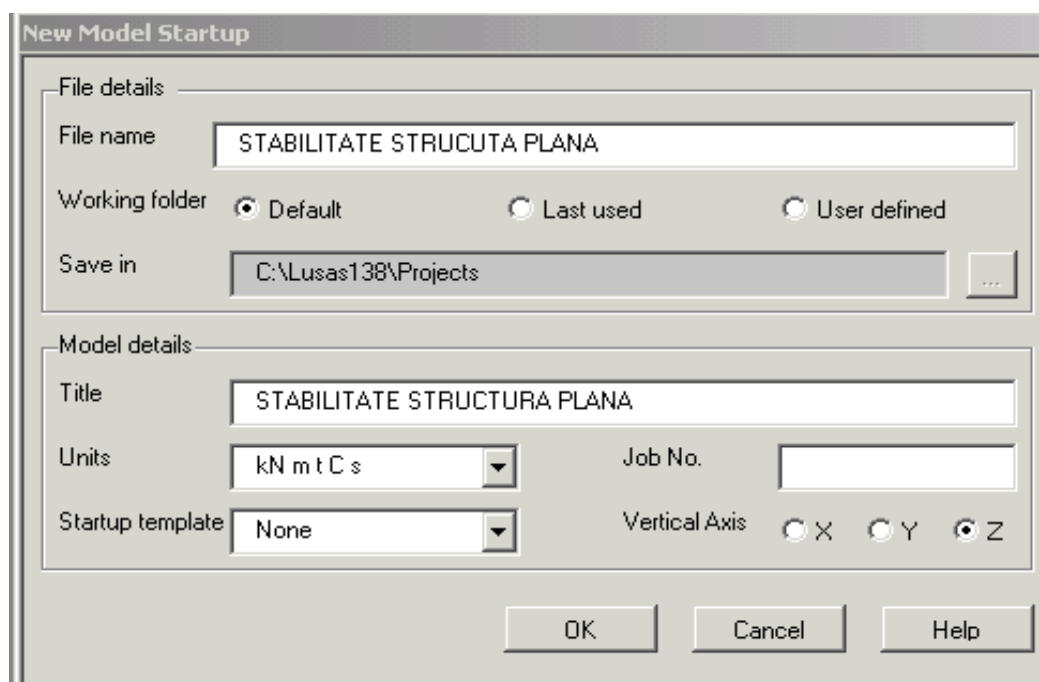


Figura 6.

File name: Numele fișierului modelului (de exemplu: STABILITATE STRUCTURA PLANA)

Title: Numele modelului (se recomandă a fi același cu numele fișierului modelului)

Units: Se selectează din meniul coloană combinația de unități de măsură utilizate pentru forțe, lungimi, masă, temperatură și timp. Meniul oferă combinații posibile pentru unitățile de măsură utilizate. Pentru prezenta analiză se va selecta combinația: kN, metri, tone, grade Celsius, secunde.

După completarea casetelor de dialog se apasă butonul **OK** care permite deschiderea interfeței de lucru a programului LUSAS, Figura 7.

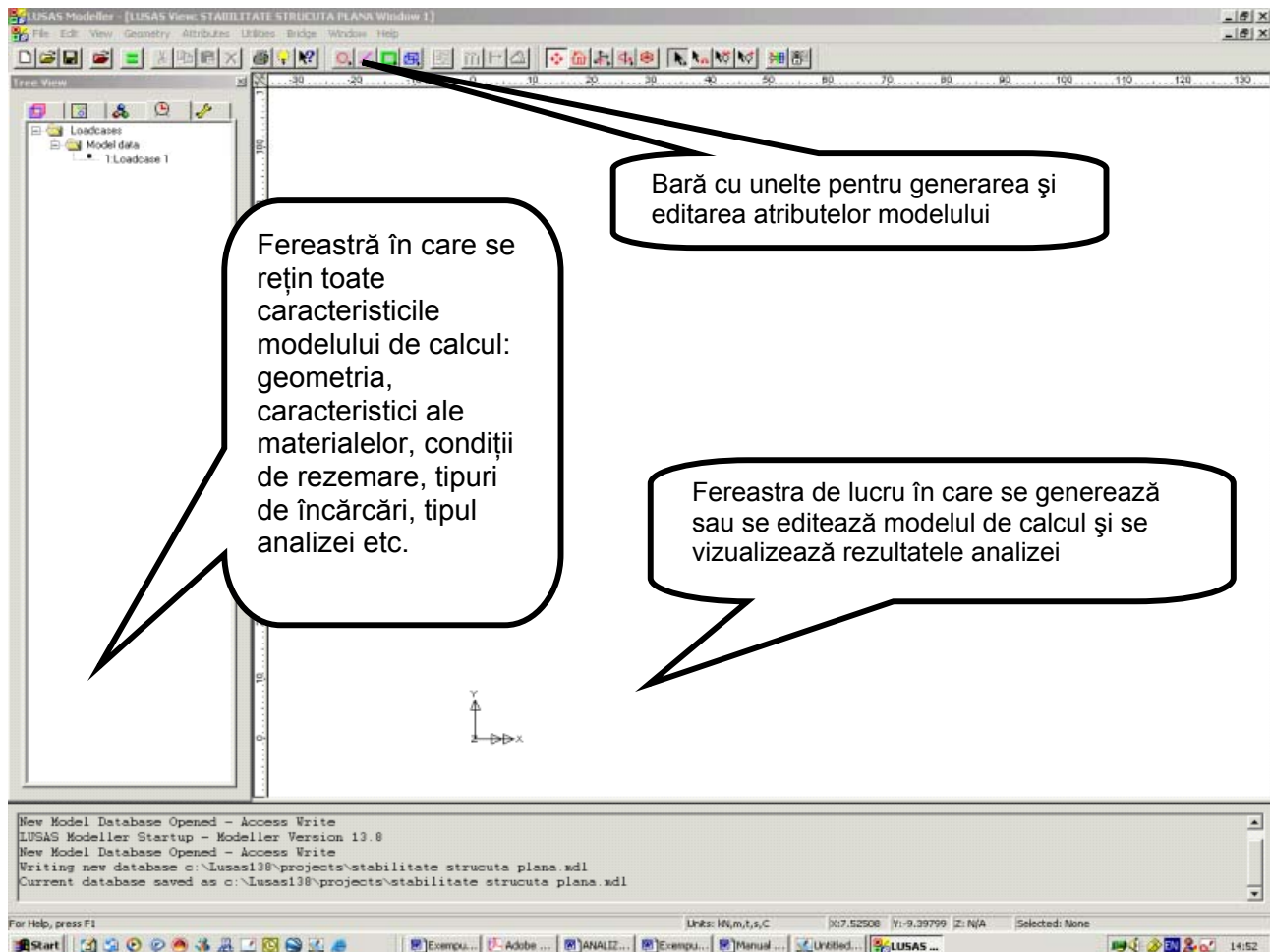



Figura 7.

În Figura 7. sunt prezentate principalele meniuri ale interfeței cu utilizatorul care permit generarea și editarea modelului, efectuarea analizei, vizualizarea rezultatelor în deplasări și eforturi și salvarea grafică a rezultatelor.

Salvarea fișierului

Se recomandă ca pe parcursul realizării modelului să salveți fișierul de lucru în mod regulat. Acest lucru vă permite reluarea sesiunilor de lucru de la ultima salvare în cazul în care ați făcut o greșală care nu poate fi corectată.

Pentru salvarea fișierului:

- fie click pe icoana 
- fie selectați opțiunea **Save** din meniul **File**

Definirea geometriei structurii

Structura analizată este alcătuită din elemente de construcție de tip grindă și în consecință definirea geometriei acestora constă în precizarea poziției punctelor nodale și a legăturilor dintre acestea cu linii drepte.


Pentru construirea geometriei modelului programul LUSAS oferă mai multe opțiuni. În cazul prezentei analize se preferă construirea modelului geometric în două etape. Prima etapă constă în introducerea independentă a punctelor nodale fie prin precizarea coordonatelor în raport cu Sistemul Global de axe, fie cu mouse-ul direct pe ecran prin click cu butonul din stânga. În acest din urmă caz este de mare ajutor activarea opțiunilor *Grid și Snap*.

După introducerea punctelor nodale, elementele structurii sunt generate direct pe ecran cu ajutorul mouse-ului selectând punctele extreme ale elementelor cu butonul din stânga, urmată de apăsarea butonului linie din meniul bară al interfeței. Ordinea în care sunt selectate nodurile la generarea unui element determină direcția elementului: de la primul nod către ultimul nod al elementului.

Deoarece structura prezintă simetrie geometrică, elastică, de rezemare și de încărcare, se poate defini numai jumătate din modelul de calcul și apoi, prin copiere în oglindă, rezultă modelul întreg.

a) Definirea punctelor

Pentru a preciza poziția punctelor care definesc geometria structurii:

- fie se deschide meniul **Geometry** urmat de opțiunea **Point și Coordinates...**,
- fie se apasă direct pe icoana 

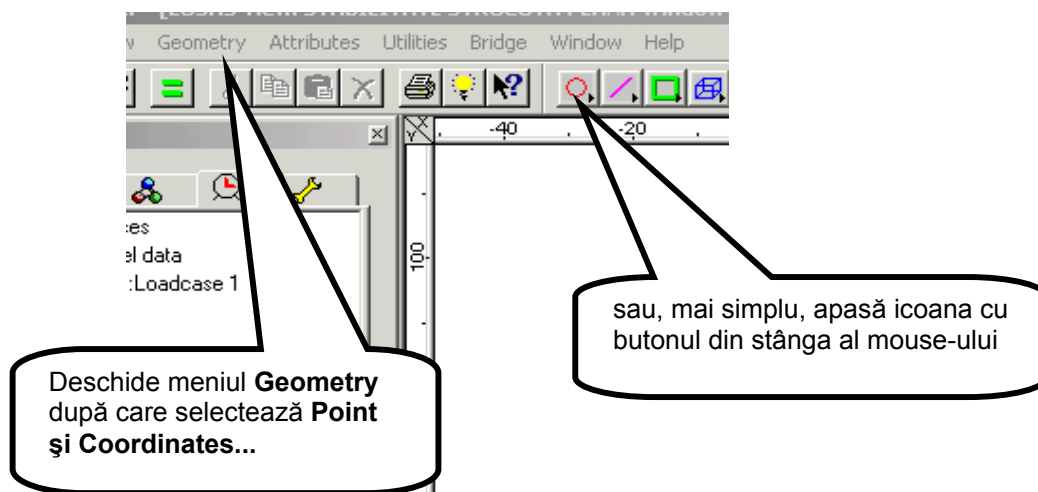


Figura 8.

Indiferent de calea urmată pe ecran este afișată o casetă de dialog (Figura 9.) în care se pot introduce coordonatele nodurilor.

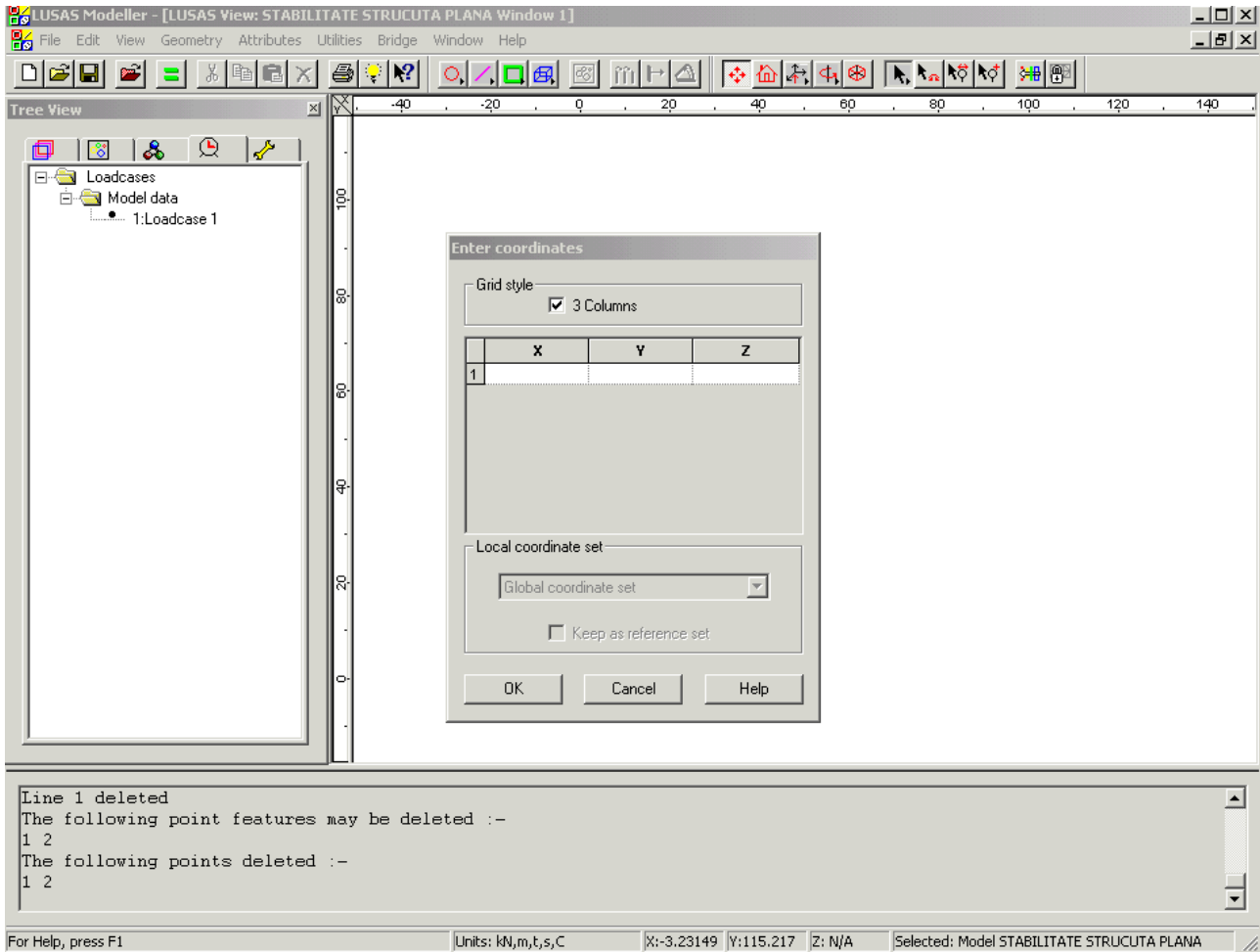
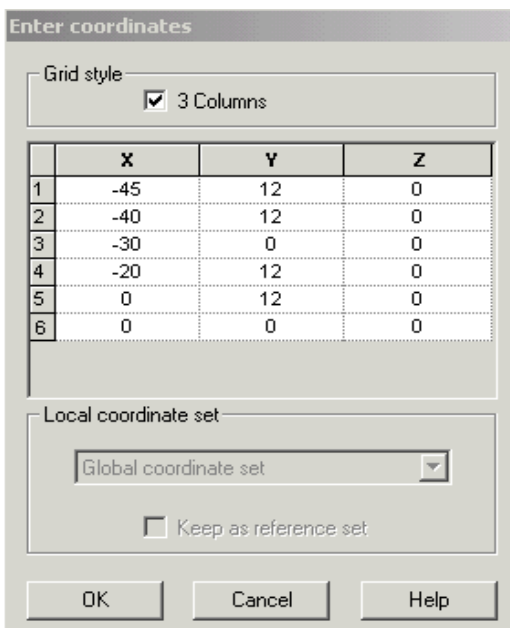


Figura 9.

În caseta de dialog se introduc coordonatele nodurilor, alegând ca origine a sistemului global de axe secțiunea de încadrare a stâlpului central al structurii. Se introduc numai nodurile situate în jumătatea din stânga a structurii, vezi Figura 10.



Observație:
Pentru a trece de la un câmp de înregistrare la altul se va utiliza tasta **Tab**

Figura 10.

După introducerea în caseta de dialog a tuturor coordonatelor punctelor de definire a geometriei structurii, prin apăsarea tastei **OK**, în spațiul de lucru al ecranului vor fi afișate în culoarea roșie cele șase puncte – vezi Figura 11.

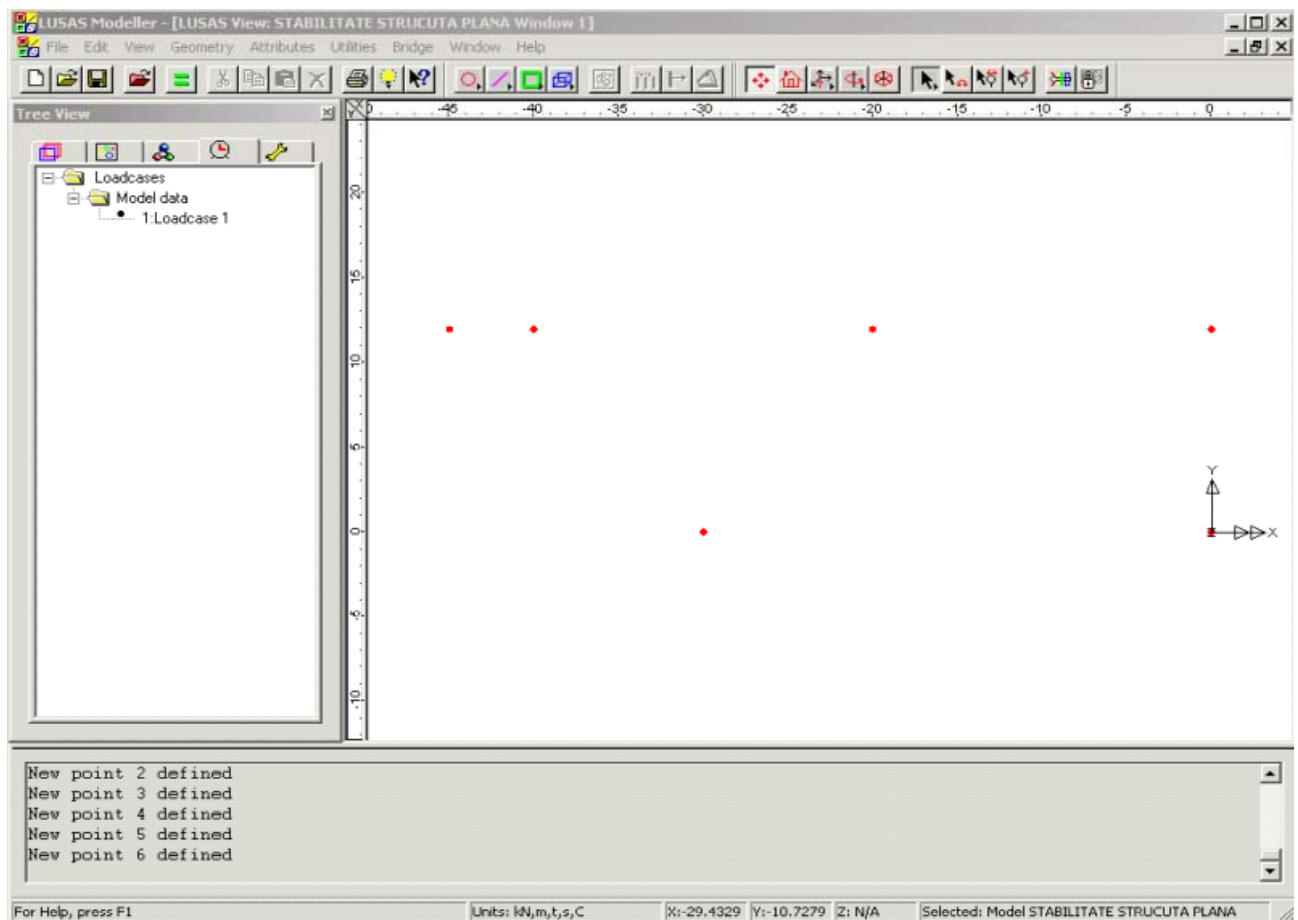


Figura 11.

Observație:

Dacă pe ecran se constată că pentru unul sau mai multe puncte coordonatele au fost greșit introduse, punctele respective pot fi șterse direct în mod grafic pe ecran prin selectare cu butonul din stânga mouse și click direct pe punct, urmată de opțiunea **Delete** de pe tastatură sau din fereastra deschisă cu butonul din dreapta al mouse-ului.


Reintroducerea punctelor șterse se face urmând pașii prezentați mai sus.

b) Definirea liniilor

Pentru a trasa o linie trebuie selectate mai întâi cele două puncte care o definesc. Ordinea în care acestea sunt selectate determină direcția liniei: de la primul nod către ultimul nod al acestuia.

Cel mai simplu, selectarea punctelor care urmează a fi unite prin o linie se face prin realizarea unei ferestre care să cuprindă numai cele două puncte:

- se poziționează cursorul în vecinătatea primului punct,
- cu butonul din stânga al mouse-ului apăsat, se realizează prin tragere o fereastră care să includă pe cel de al doilea punct,
- se eliberează butonul mouse-ului și cele două puncte selectate își schimbă culoarea din roșu în negru.

Cu cele două puncte selectate se alege opțiunea **Line** prin apăsarea butonului . Pe ecran va fi afișată linia ce unește cele două puncte selectate – vezi figurile de mai jos. Pentru a deselecta cele două puncte utilizate la generarea unei linii, se face click cu butonul stânga mouse în câmpul liber al ecranului de lucru.

Generarea liniei 1 – Figura 12.

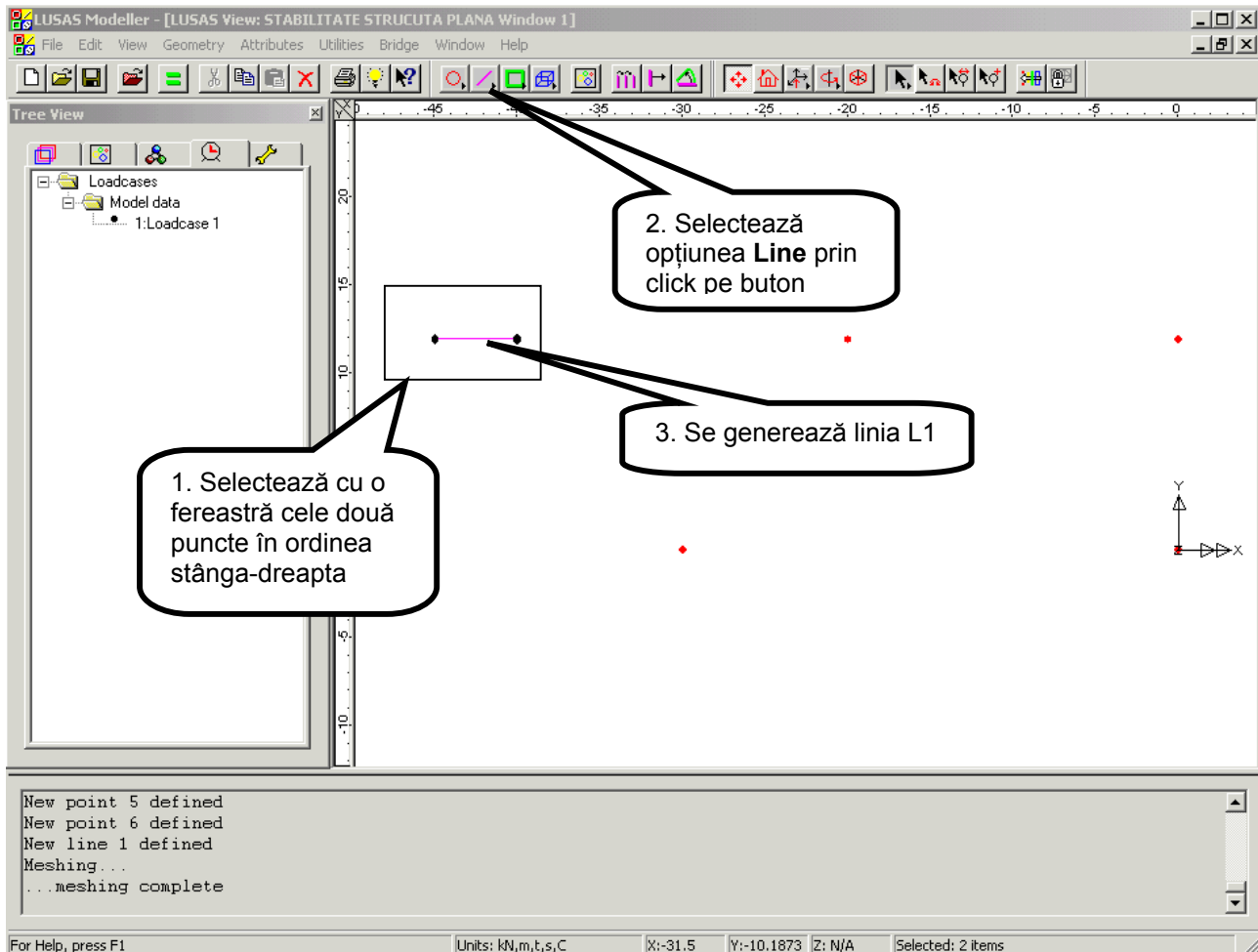


Figura 12.

Generarea liniilor 2 și 3 – Figura 13.

Procedând ca în cazul generării liniei 1, prin selectarea a câte două puncte pe ecran se generează liniile 2 și 3 care aparțin tablierului structurii – vezi Figura 13.

Pentru a păstra un sens de parcurs unitar al liniilor structurii, stânga – dreapta pentru cele orizontale și de jos în sus pentru cele înclinate sau verticale, la generarea liniilor corespunzătoare stâlpilor structurii, selectarea punctelor se va face pornind de la cele de rezemare către cele care aparțin tablierului – vezi Figura 14. și 15.

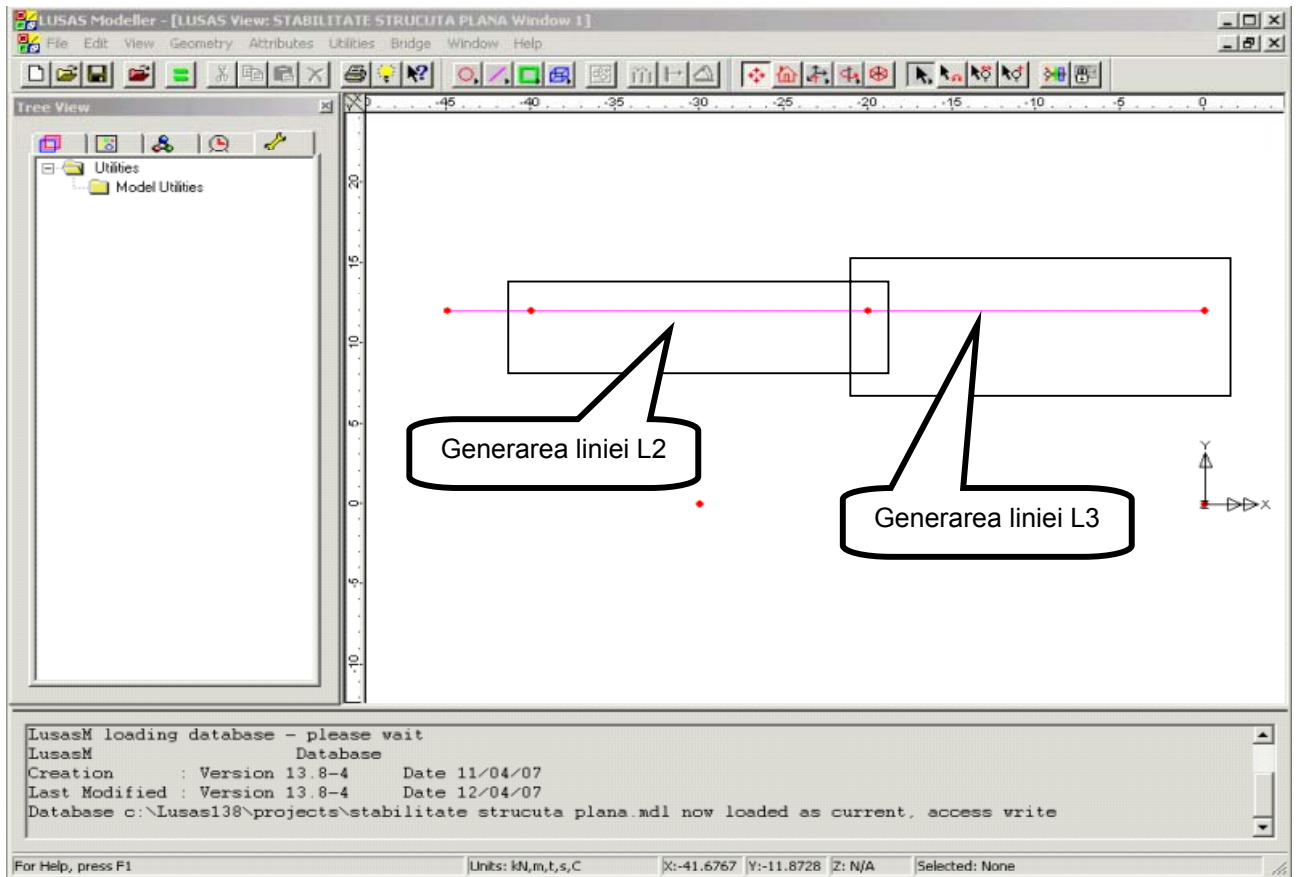


Figura 13.

Generarea liniei L4 – Figura 14.

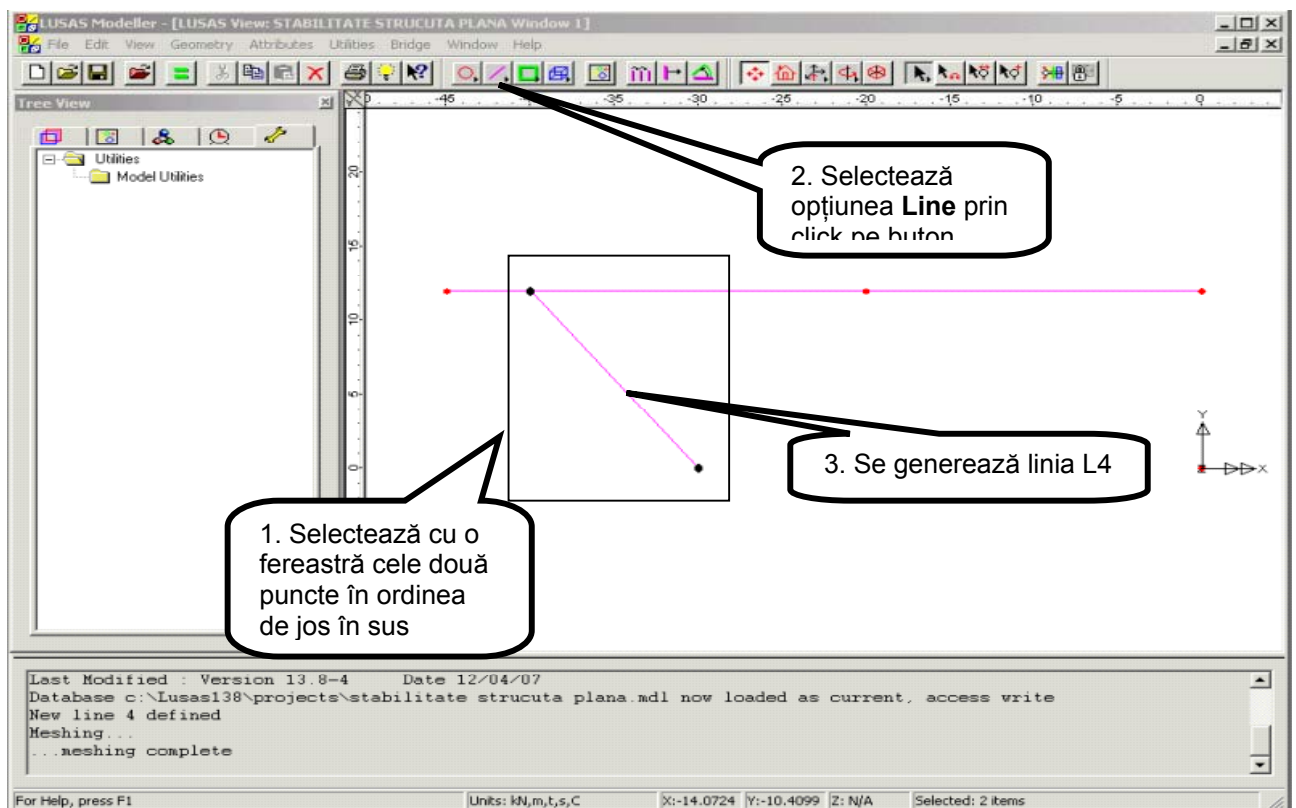


Figura 14.

Generarea liniilor 5 și 6 – Figura 15.

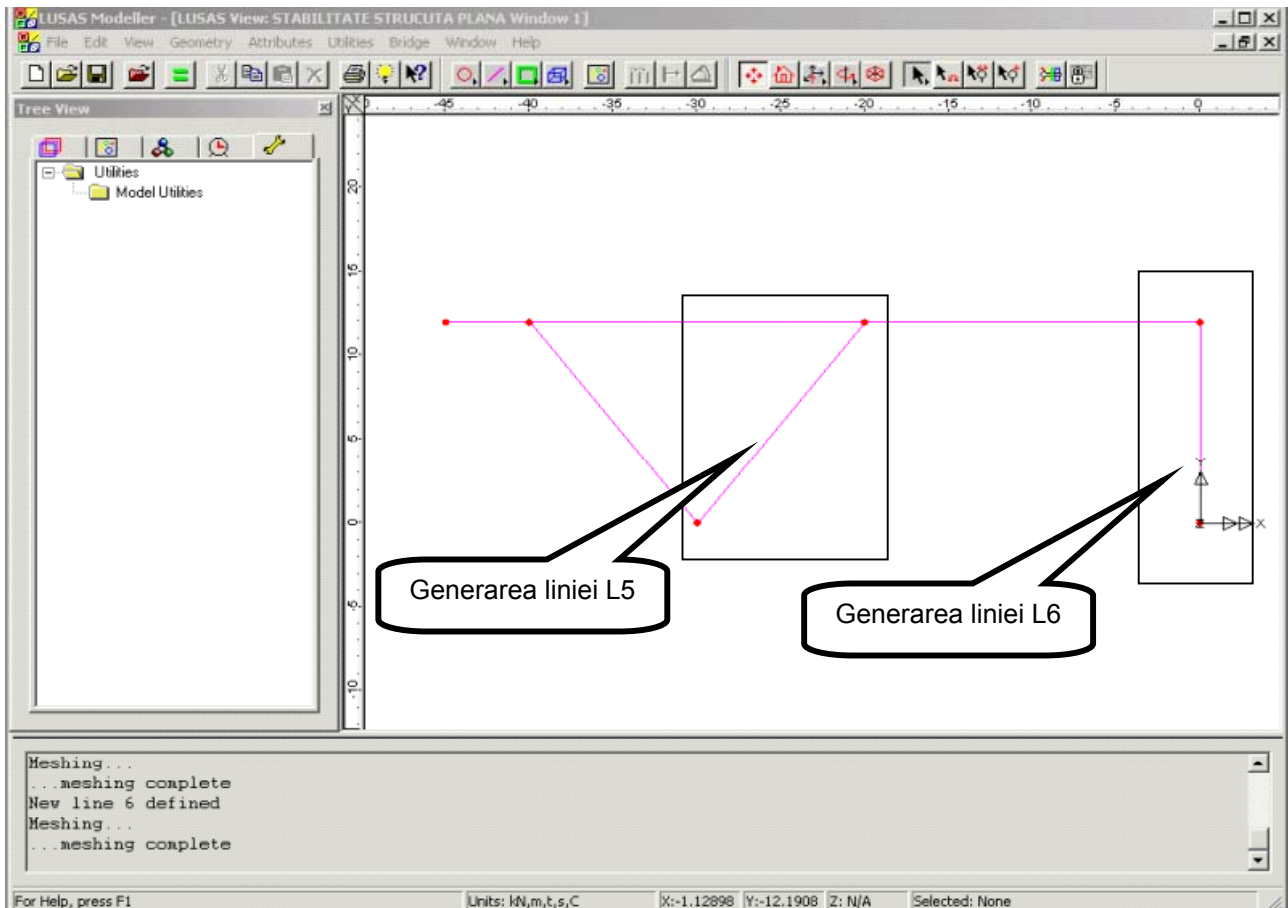


Figura 15.

Sensurile liniilor generate trebuie să corespundă convenției stabilite mai sus și pot fi verificate grafic - vezi Figura 16.

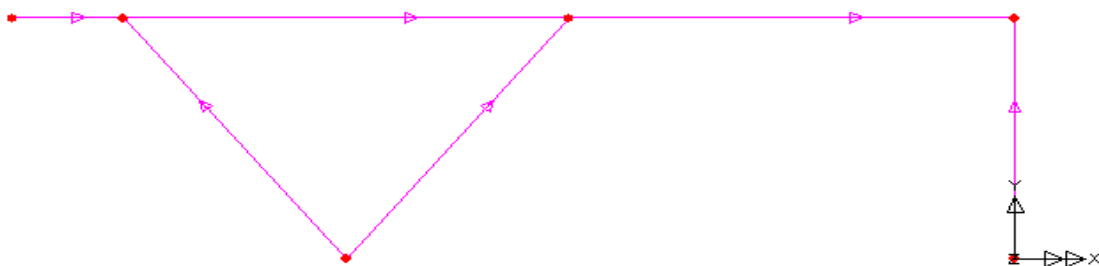


Figura 16.

Sensul acestor linii au importanță la stabilirea axelor locale ale grinzilor care vor modela comportarea stucturii și la reprezentarea rezultatelor analizei.

Pentru a verifica pe ecran sensurile liniilor generate se parcurg pașii prezentați în Figura 17.

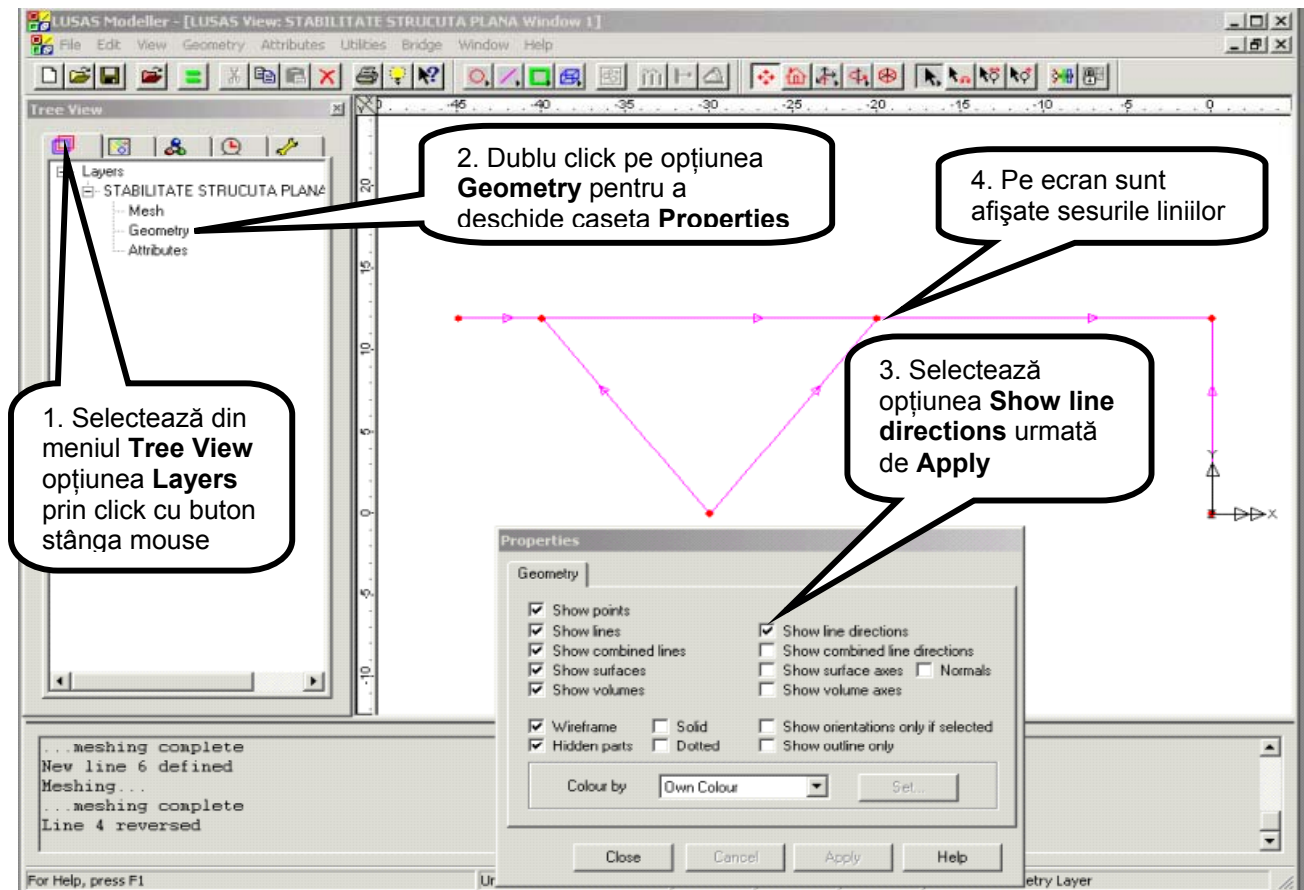


Figura 17.

Pentru a șterge de pe ecran sensurile liniilor, se deselectionează opțiunea **Show line directions**, urmată de click pe butonul **O.K.** Caseta de dialog privind proprietățile modelului geometric dispare de pe ecran.

Modelul geometric reprezentat de axele grinzilor structurii va fi transformat în model de calcul prin alocarea unor atribute privind: tipul elementelor de grindă, caracteristicile geometrice ale secțiunilor transversale, caracteristicile materialelor, condiții de rezemare și de încărcare.

Modelarea cu elemente de grindă

Fiecare linie din modelului geometric va fi discretizată cu un număr de elemente de grindă plană specializate în modelarea comportării nelinier geometrice și a flambajului prin bifurcare. Pentru analiza flambajului se va selecta din biblioteca de elemente a programului LUSAS elementul de grindă **BM3**.

Acest element poate modela grinzi cu axa curbă și cu variație a caracteristicilor geometrice în lungul axei lor. În formularea elementului s-a considerat o variație parabolică de gradul doi a deplasărilor axiale și de gradul trei pentru deplasările normale pe axa elementului. În acest mod se asigură o variație liniară a forței axiale și a momentului încovoietor pe lungimea elementului. Deformațiile de lunecare sunt neglijate.

Dacă în calculul liniar elastic al structurilor se admite discretizarea unei linii a structurii cu un singur element de grindă, pentru calculul nelinier și de pierdere a stabilității elastice se recomandă ca fiecare linie a structurii să fie discretizată cu cel puțin două elemente de grindă.

Din motive de precizie a calculului și a reprezentării grafice a formei deformate, în cadrul prezentei analize se va adopta o discretizare cu patru elemente de grindă a fiecărei linii a structurii.

Definirea elementelor de grindă

Pentru definirea tipului de element de grindă utilizat la modelarea structurii se deschide meniul **Attributes**, urmat de opțiunea **Mesh** și **Line** – Figura 18.

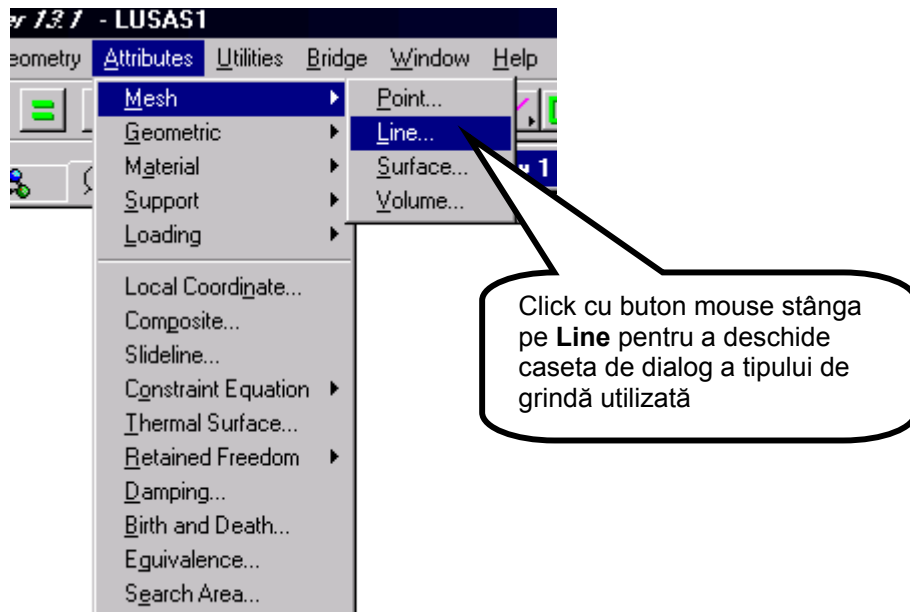


Figura 18.

Pentru prezenta analiză se vor utiliza următoarele opțiuni:

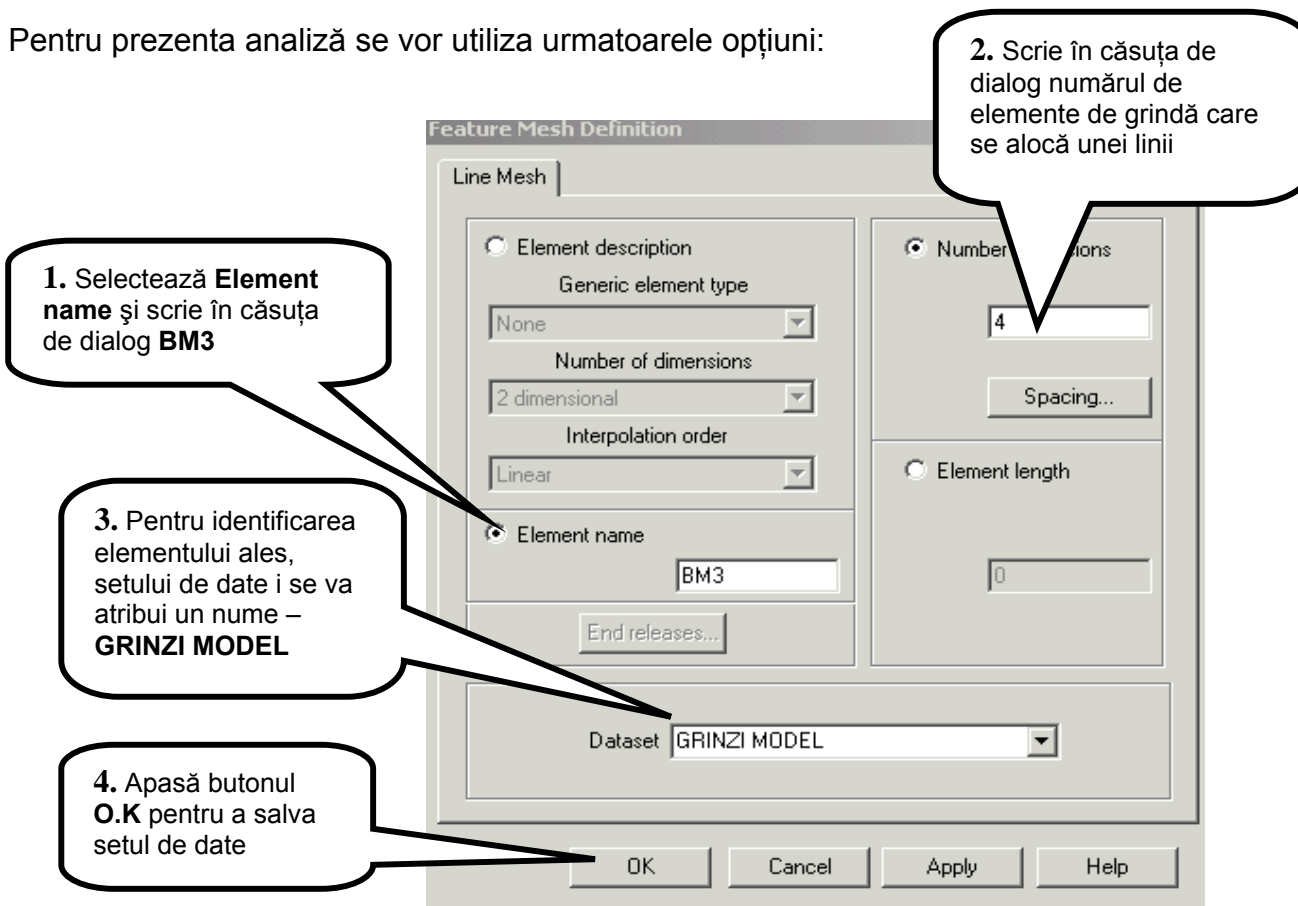


Figura 19.

După salvarea setului de date, în fereastra din stânga, în arborele cu atribute (**Tree View**) va fi afișat noul set de date definit (**GRINZI MODEL**) – Figura 20.

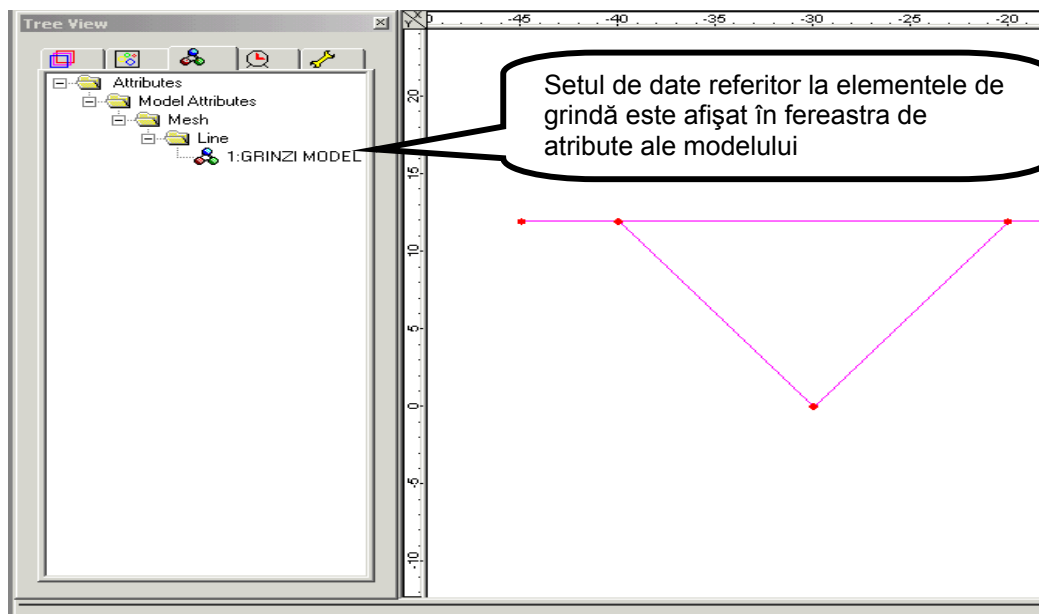


Figura 20.

Pentru analiza stabilității echilibrului elastic, discretizarea fiecărei linii a modelului geometric cu câte patru elemente de grindă este recomandată pentru stâlpi și tablier care sunt solicitate la încovoiere cu forță axială, dar neadecvată pentru consolele structurii la care solicitarea axială este inexistentă.

În aceste condiții este necesar a se defini un nou set de date privind elementele de grindă la care numărul de elemente care se alocă unei linii va fi unu – vezi Figura 21

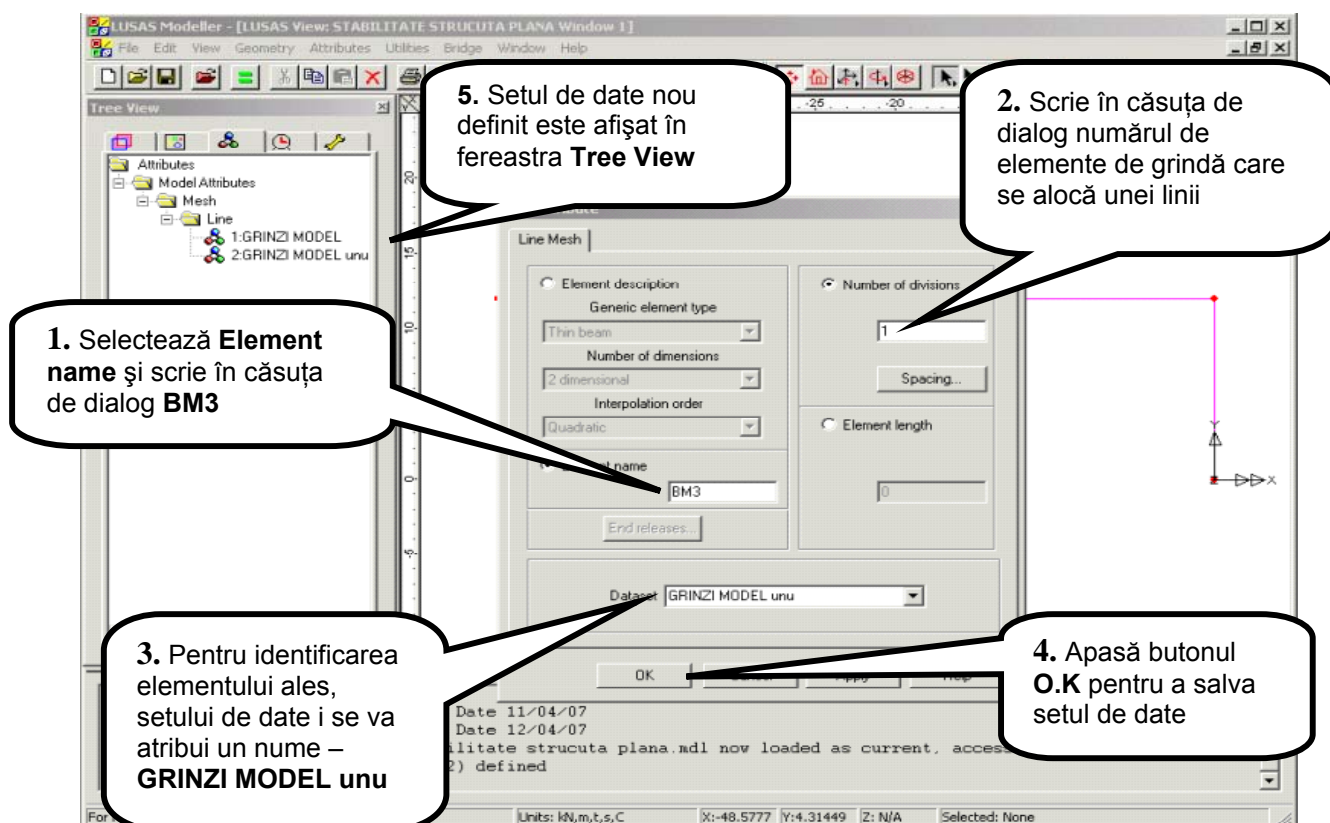


Figura 21.

Atribuirea elementelor de grindă liniilor modelului geometric

Cele două seturi de date care definesc elementele de grindă ale modelului discret vor fi atribuite liniilor modelului geometric. Setul de date **GRINZI MODEL unu** va fi atribuit consolei structurii, iar setul de date **GRINZI MODEL** va fi atribuit stâlpilor și tablierului structurii.

a) Pentru discretizarea consolei se parcurg următorii pași (Figura 22.):

- se selectează linia care reprezintă consola prin click direct pe ea cu ajutorul butonului stânga mouse,
- din fereastra din stânga, meniul **Tree View**, se selectează setul de date **GRINZI MODEL unu** cu butonul din stânga al mouse-ului,
- se ține apăsat butonul mouse-ului și se trage în fereastra de lucru,
- se eliberează butonul mouse-ului.

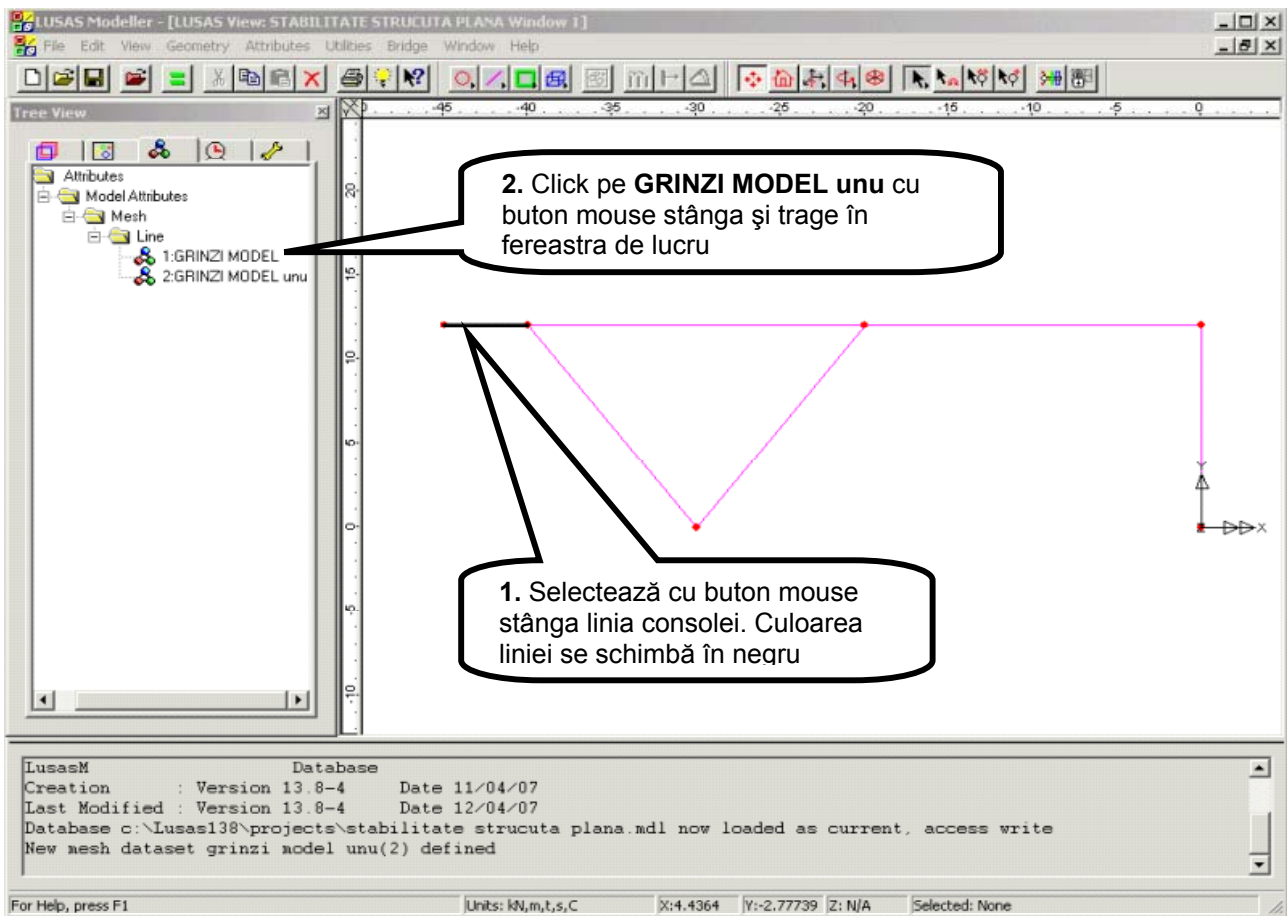


Figura 22.

b) Pentru discretizarea stâlpilor și tablierului se parcurg pașii menționați în Figura 23.

- se selectează direct pe ecran, cu ajutorul unei ferestre grafice, stâlpul și tablierul structurii. Liniile selectate își schimbă culoarea în negru,
- cu butonul din stânga al mouse-ului se selectează setul de date **GRINZI MODEL** din fereastra din stânga, meniul **Tree View**,
- se ține apăsat butonul mouse-ului și se trage în fereastra de lucru,
- se eliberează butonul mouse-ului.

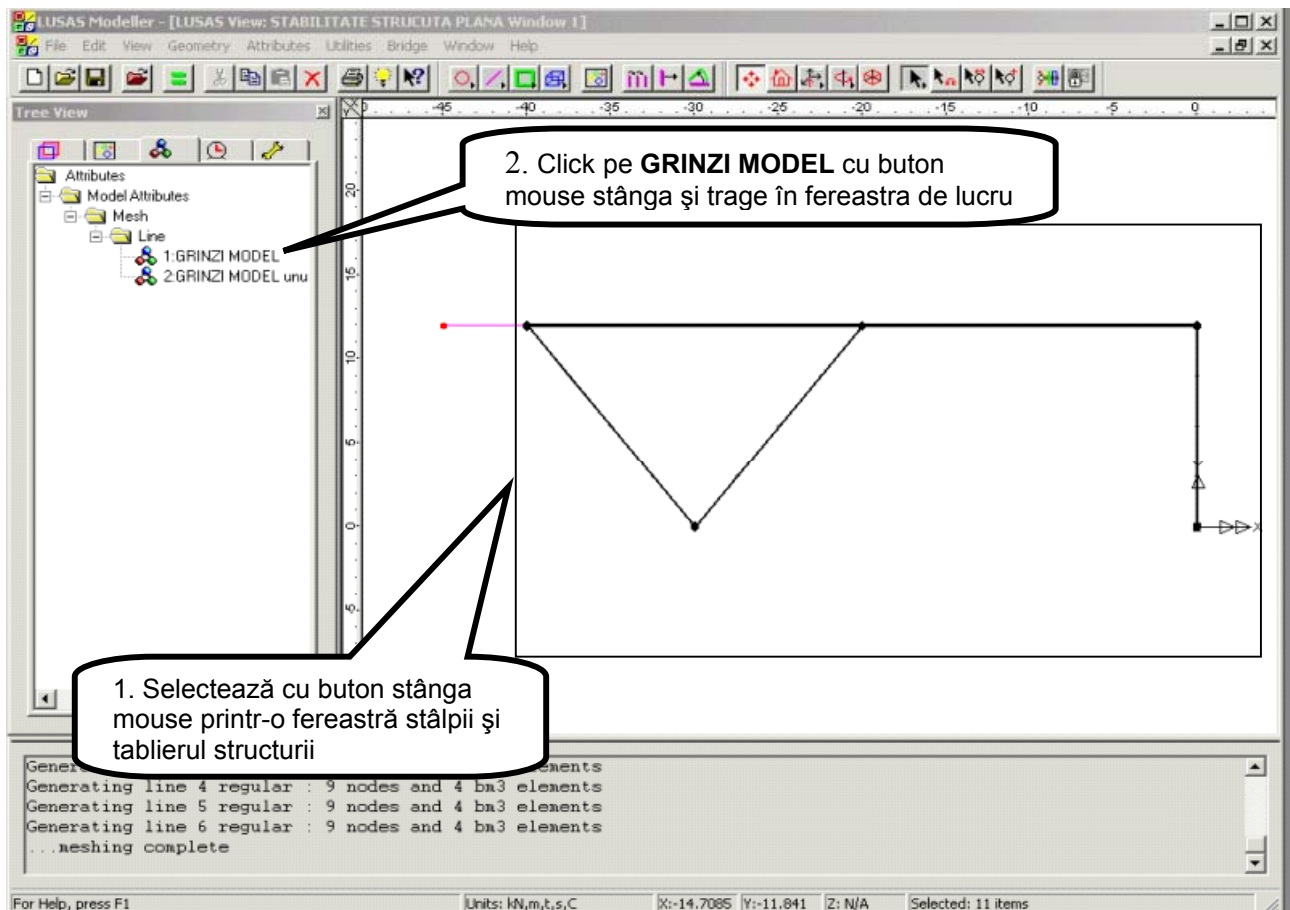


Figura 23.

Numerele nodurilor modelului discret generate ca urmare a atribuirii elementelor de grindă liniilor modelului geometric, pot fi afișate pe ecran prin click cu butonul dreapta mouse în spațiul liber al ecranului de lucru, urmată de selectarea opțiunii **Labels**, care va deschide o casetă de dialog – vezi Figura 24.

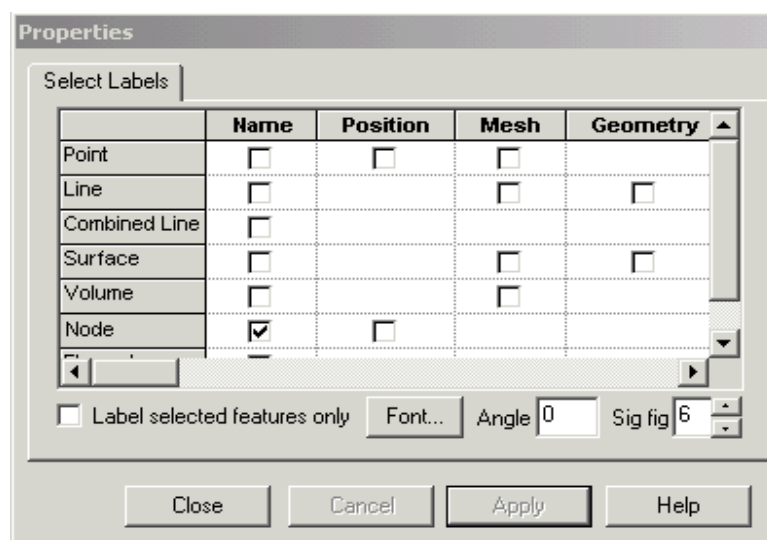


Figura 24.

În caseta de dialog se selectează opțiunea **Node** urmată de click pe butonul Apply. În ecranul de lucru pe modelul discret al structurii vor fi afișate numerele nodurilor generate – vezi Figura 25.

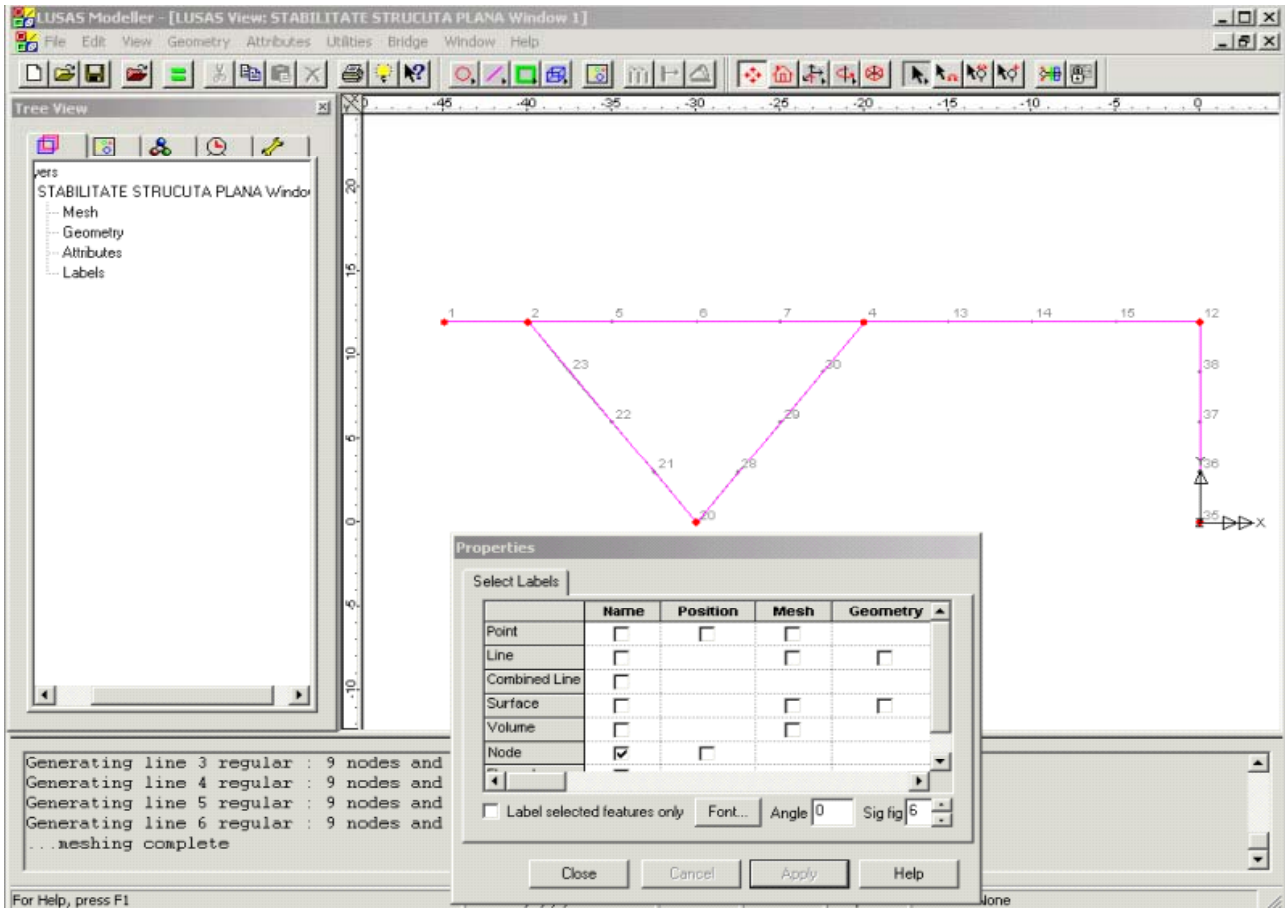


Figura 25.

Pentru a renunța la prezentarea pe ecran a numerelor nodurilor generate se deselectionează opțiunea **Node** urmată de click pe butonul **OK**.

Caracteristici ale materialului

a) Definirea caracteristicilor fizico - mecanice

Pentru a defini caracteristicile elastice ale materialului din care este confecționată structura se parcurg următorii pași:

- se deschide meniul **Attributes**,
- se alege opțiunea **Material**, **Isotropic...** (Figura 26.),
- în caseta de dialog se definesc caracteristicile fizico-mecanice ale materialului (Figura 27.),
- pentru identificarea caracteristicilor definite, setului de date i se va atribui un nume (**BETON**),
- click **OK** .

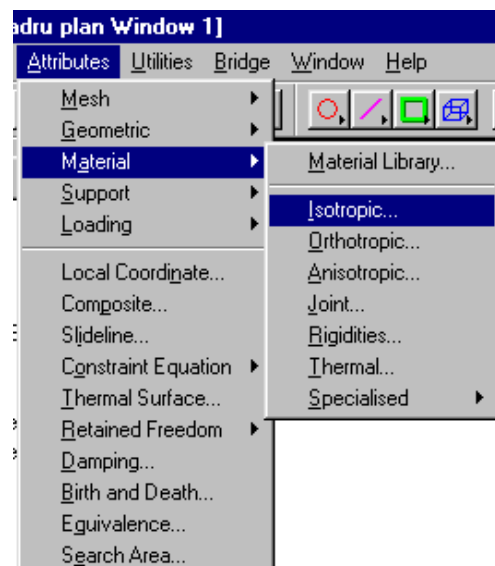


Figura 26.

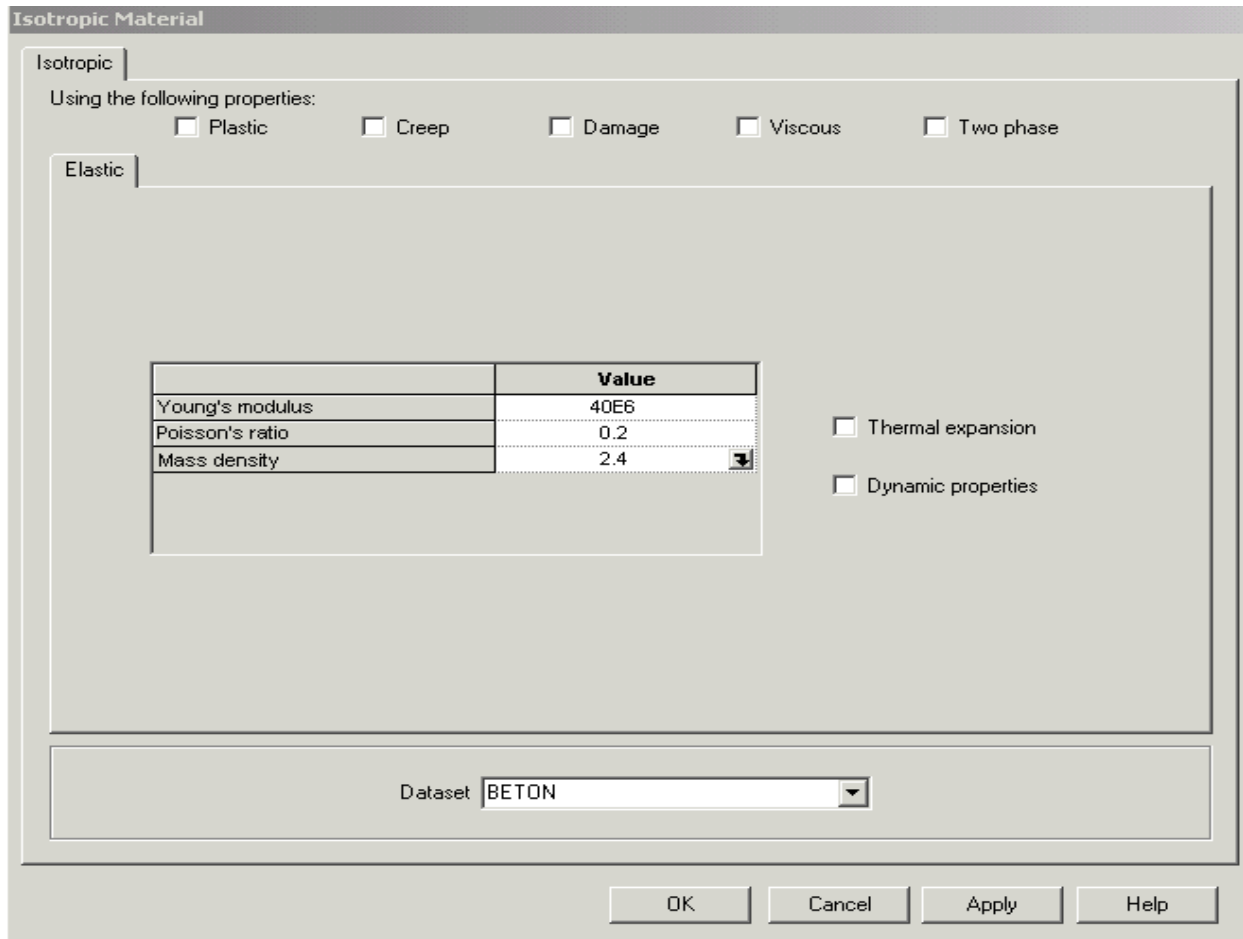


Figura 27.

După salvarea datelor referitoare la caracteristicile materialului, acestea pot fi identificate în fereastra **Tree View** prin numele alocat – BETON (Figura 28.).

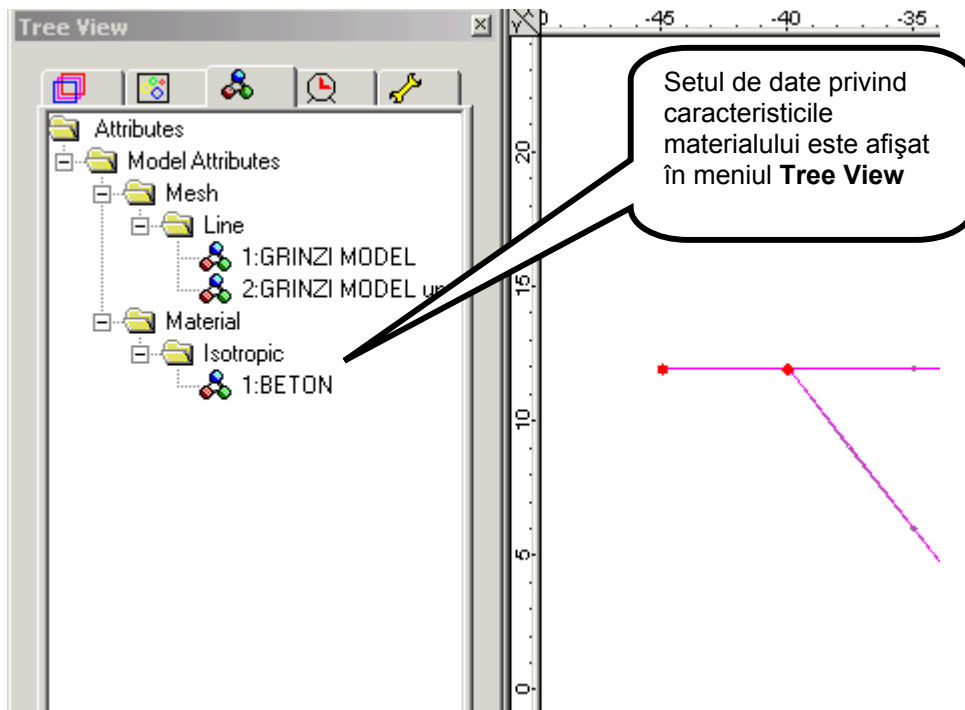


Figura 28.

b) Atribuirea caracteristicilor definite

Caracteristicile materialului definite prin setul de date BETON vor fi atribuite tuturor liniilor modelului structurii. Se vor parcurge următorii pași (vezi Figura 29):

- se selectează tot modelul cu o fereastră grafică
- cu butonul din stânga al mouse-ului se selectează setul de date **BETON** din fereastra din stânga, meniul **Tree View**
- se ține apăsat butonul mouse-ului și se trage în zona selectată
- se eliberează butonul mouse-ului
- în caseta de dialog se verifică dacă este selectată opțiunea **Assign to lines**
- click **OK**

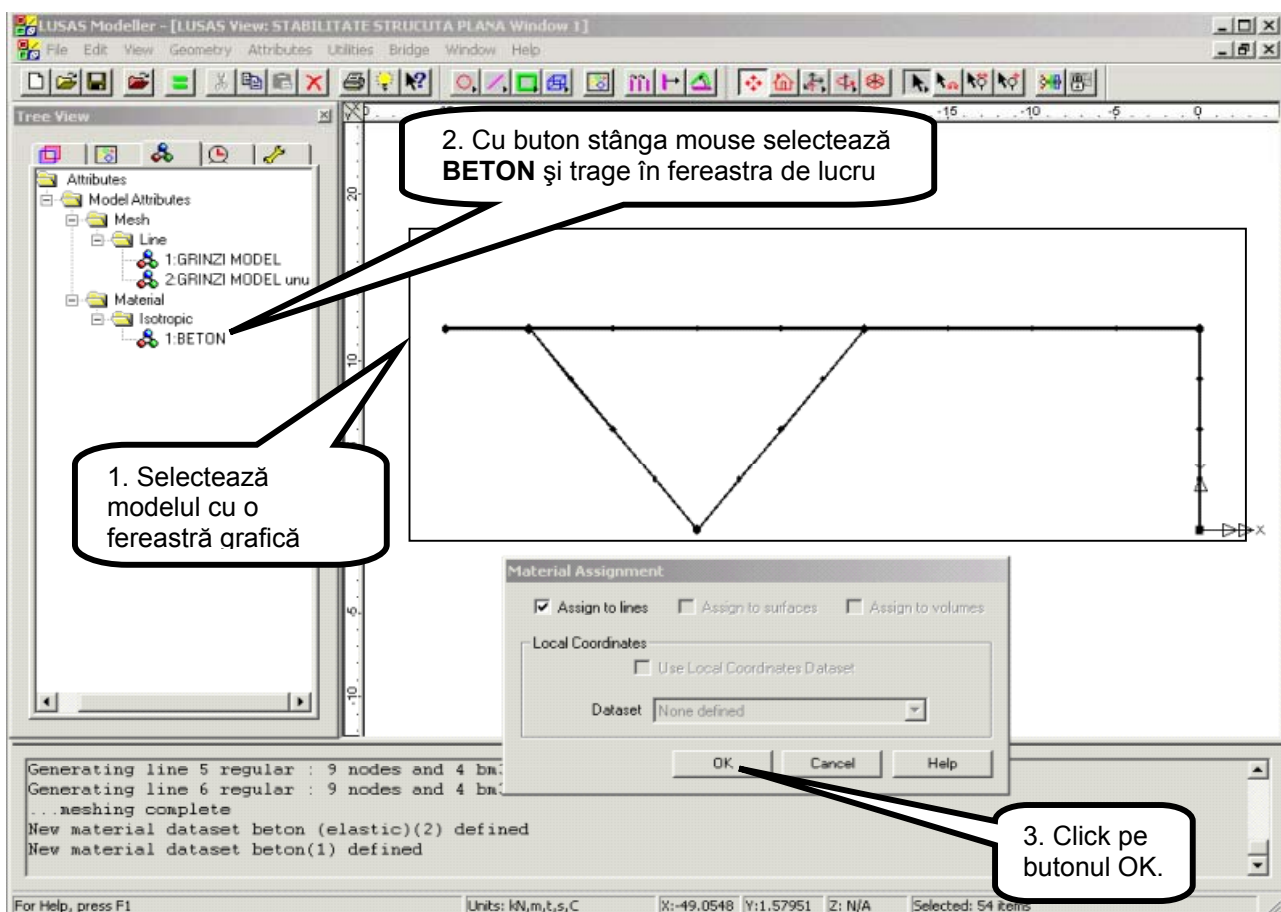


Figura 29.

Caracteristici geometrice ale secțiunilor transversale

a) Definirea caracteristicilor geometrice

Structurile tip cadre plane (2D) sunt solicitate predominant la încovoiere cu forță tăietoare și la forță axială. Pentru acest tip de structuri caracteristicile geometrice ale secțiunilor transversale care trebuie obligatoriu furnizate sunt: aria secțiunii transversale și momentul de inerție axial central și principal în raport cu axa de încovoiere.

Valorile caracteristicilor secțiunilor transversale ale elementelor structurii au fost prezentate în secțiunea **Descrierea structurii** unde caracteristicile care intervin în analiză sunt prezentate cu caractere bold.

Pentru prezenta analiză se vor defini trei seturi distincte de caracteristici geometrice corespunzător celor trei elemente structurale de bază: tablier, stâlpi înclinați și stâlpul vertical.

Definirea fiecărui set de caracteristici geometrice se face parcurgând următorii pași:

- se deschide meniul **Attributes**,
- se alege opțiunea **Geometric, Line...** și se deschide caseta de dialog din Figura 30.,
- se selectează opțiunea **Thin beams** care corespunde caracteristicilor geometrice ale secțiunilor grinzilor la care sunt neglijate deformațiile de lunecare,
- se completează câmpurile casetei de dialog cu valorile ariei, momentelor de inerție axiale și momentul de inerție la torsiune,
- se atribuie un nume de identificare setului de date (de exemplu TABLIER), urmată de click pe butonul **OK**.

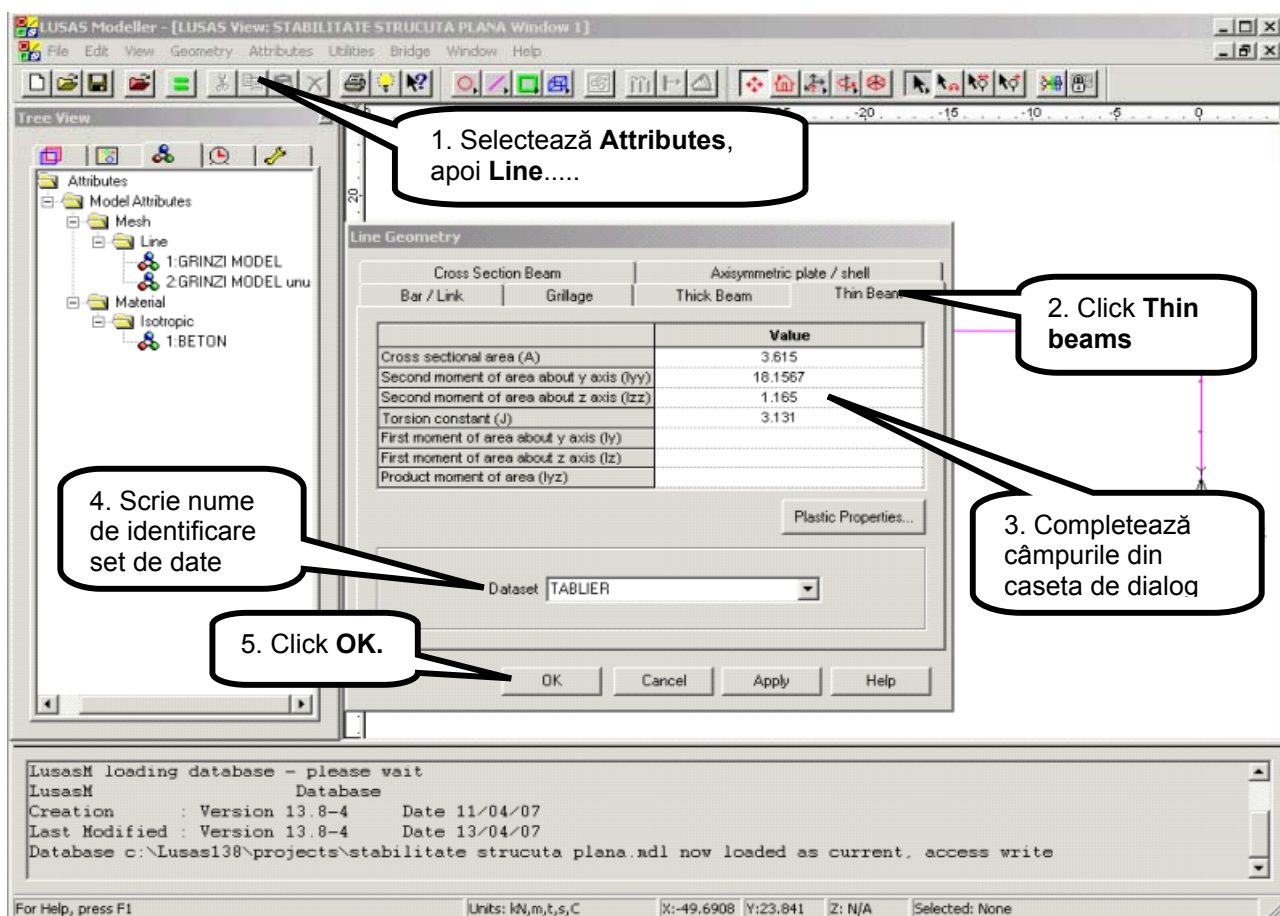
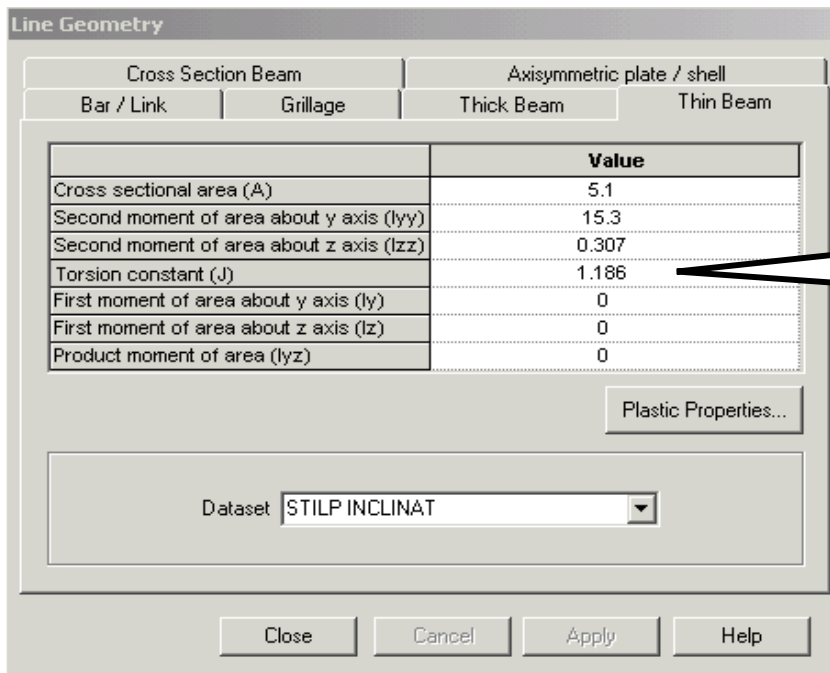


Figura 30.

Setul de date definit este salvat în meniul **Tree View** și va putea fi utilizat ulterior pentru atribuirea lor elementelor structurii.

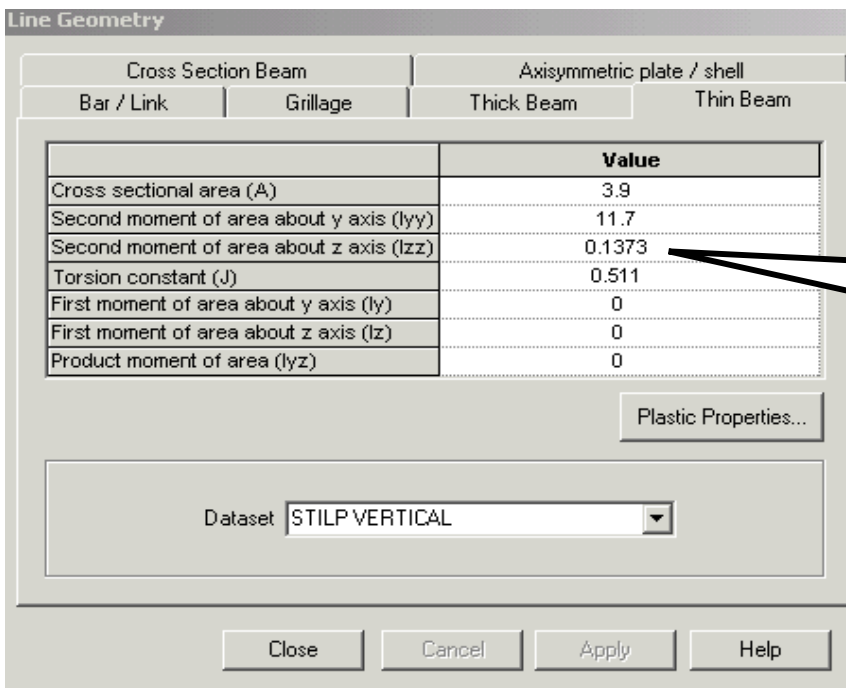
Procedând similar se definesc seturile de date pentru caracteristicile geometrice ale stâlpilor înclinați și respective vertical – vezi Figura 31. și 32.

Seturile de date definite pot fi regăsite în meniul **Tree View** din stânga ecranului de lucru – vezi Figura 33.



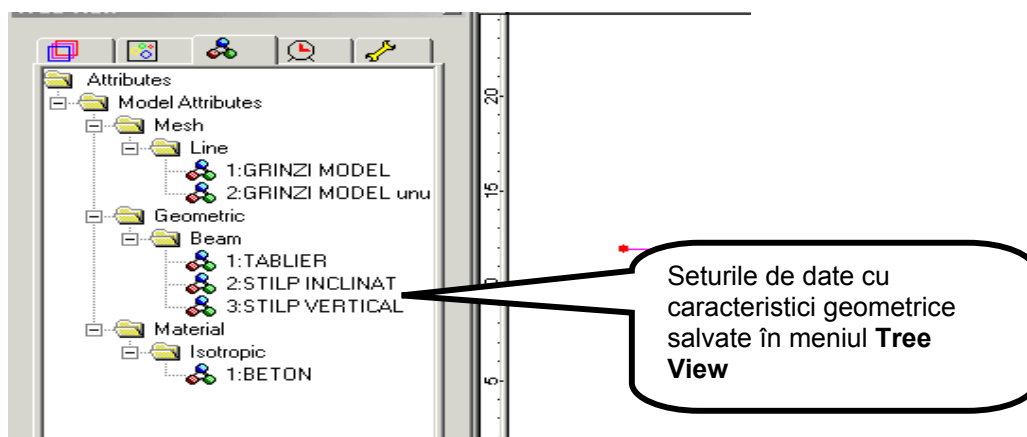
Caracteristici
geometrice pentru
Stâlp înclinat

Figura 31.



Caracteristici
geometrice pentru
Stâlp vertical

Figura 32.



Seturile de date cu
caracteristici geometrice
salvate în meniul **Tree
View**

Figura 33.

b) Atribuirea caracteristicilor geometrice definite

Pentru a atribui seturile de date cu caracteristici geometrice elementelor structurii se parcurg următorii pași:

- se selectează cu o fereastră grafică elementele structurii, de exemplu elementele tablierului – vezi Figura 34.,
- se selectează setul de date care va fi atribuit elementelor selectate, în acest caz **TABLIER**, din fereastra din stânga, meniul **Treeview**, apăsând butonul din stânga al mouse-ului,
- se ține apăsat butonul mouse-ului, se trage în zona selectată a modelului,
- se eliberează butonul mouse-ului.

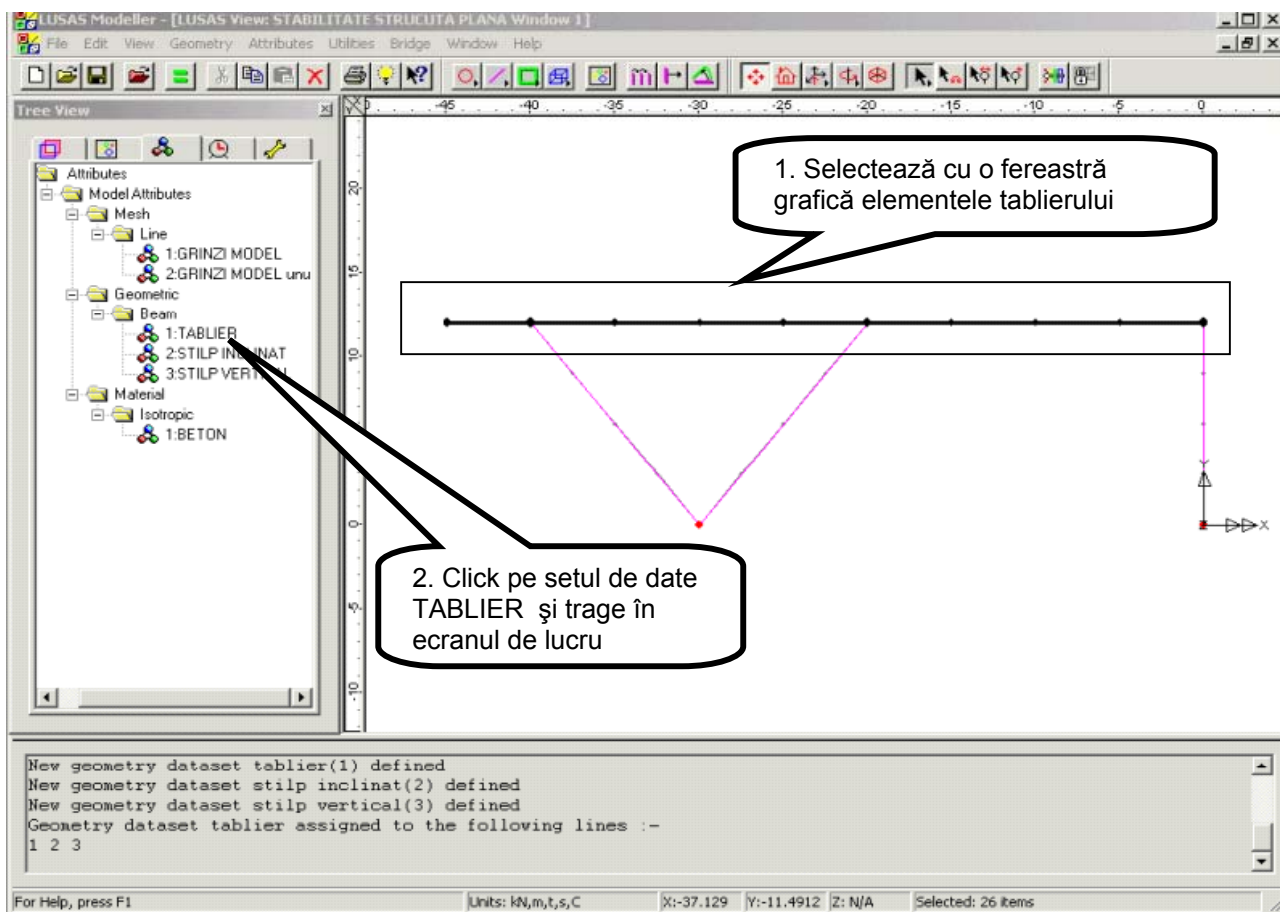


Figura 34.

Pentru atribuirea caracteristicilor geometrice ale stâlpilor înclinați și respectiv vertical, se parcurg pașii prezentați mai sus, cu selectarea din meniul **Tree View** a seturilor de date corespunzătoare – Vezi Figura 35. și 36.

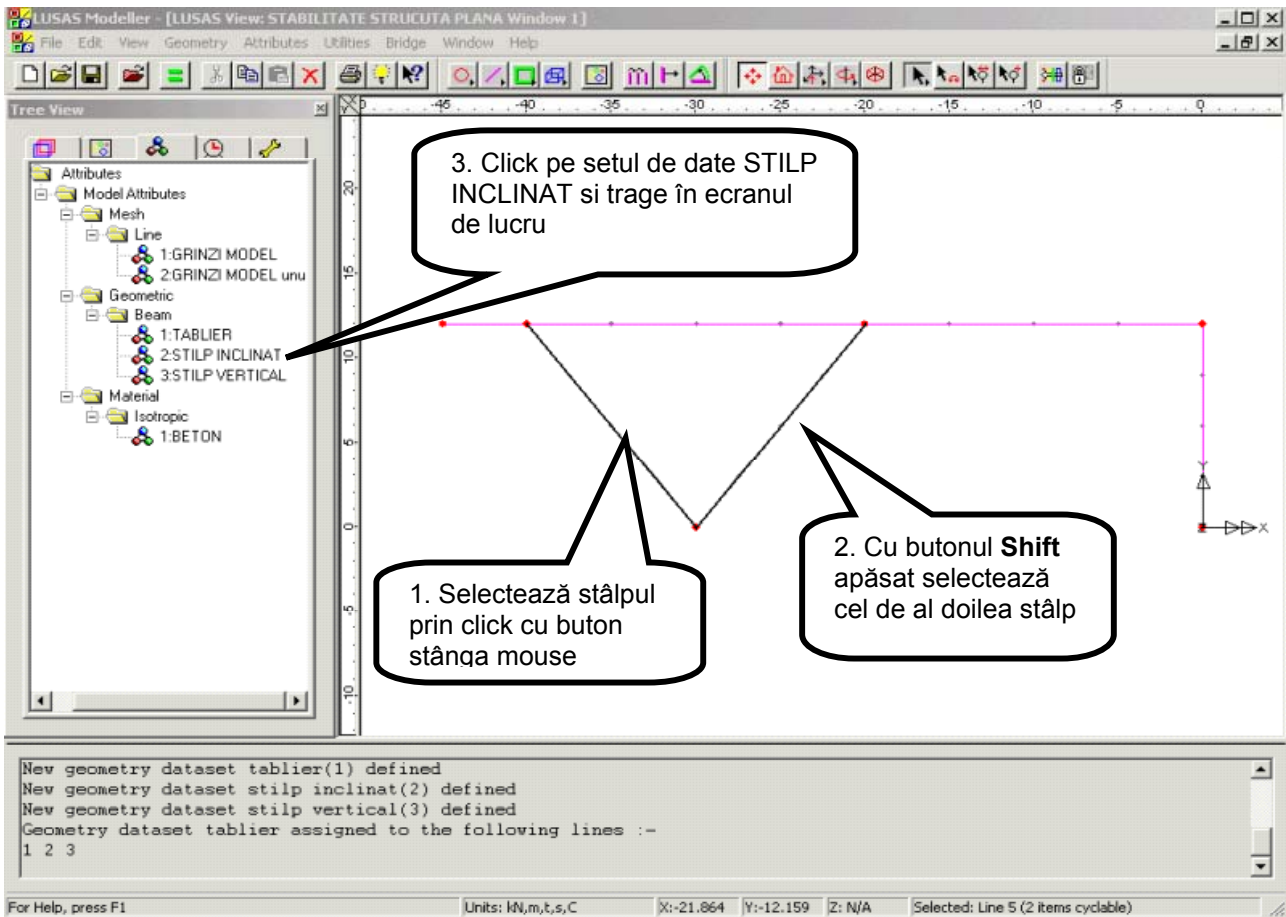


Figura 35.

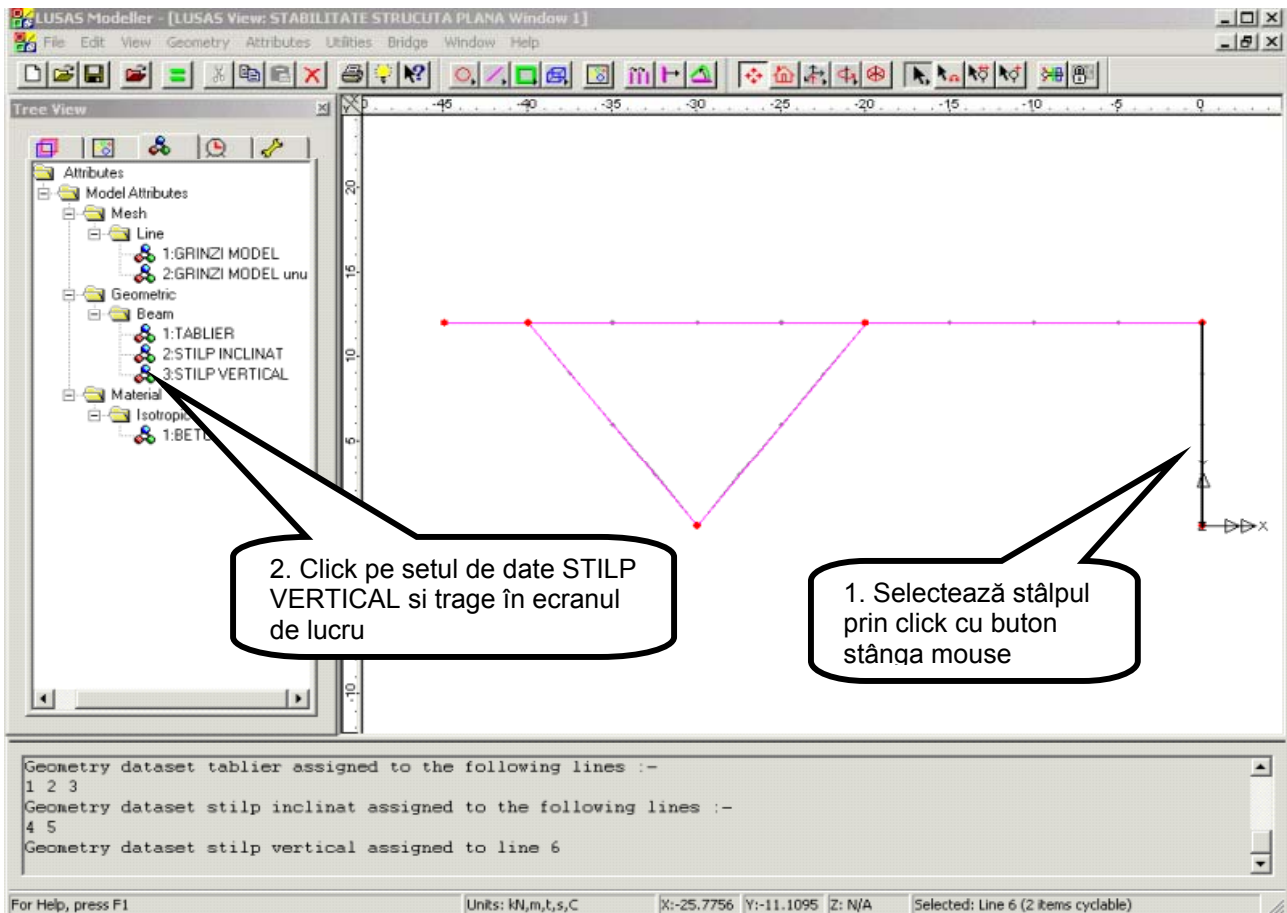


Figura 36.

Condiții de rezemare

Condițiile de rezemare ale structurii se referă la deplasările împiedicate ale punctelor de rezemare, cu componente exprimate în Sistemul Global de axe.

În cazul structurilor plane nodurile structurii dispun de câte trei grade de libertate: translații în raport cu axele **OX** și **OY**, respectiv rotirea în raport cu axa **OZ** (perpendiculară pe planul structurii).

Structura analizată are trei puncte de rezemare, nodurile de intersecție a stâlpilor înclinați, unde sunt prevăzute reazeme articulate și nodul de rezemare a stâlpului vertical.

Condițiile de rezemare vor prevedea deplasări de tip translații egale cu zero (D_x și D_y) și rotire liberă (R_z) la cele două puncte de rezemare tip articulație și translații și rotire egale cu zero în încastrare.

a) Definirea condițiilor de rezemare

Se vor defini două seturi de date privind condițiile de rezemare, corespunzător celor două tipuri de reazeme.

Pentru a defini datele pentru reazemul încastrat se parcurg următorii pași:

- se deschide meniul **Attributes**,
- se alege opțiunea **Support, Structural...** vezi Figura 37., care deschide o casetă de dialog – Figura 38.,

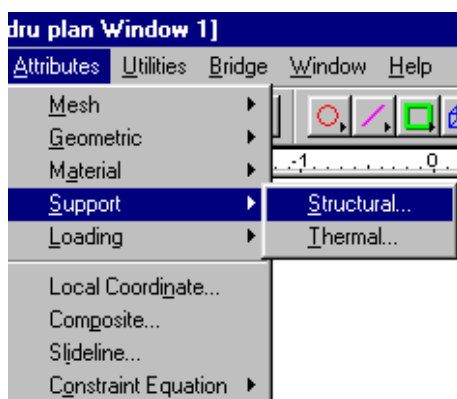
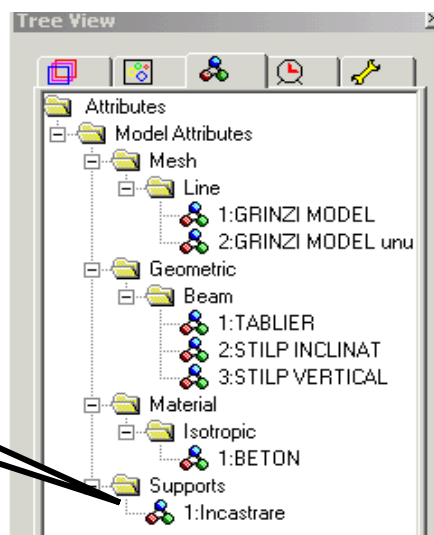


Figura 37.

- în caseta de dialog se definesc condițiile de rezemare: sunt împiedicate translațiile după axele **X** și **Y (Fixed)** și rotirea după axa **Z**,
- pentru identificarea caracteristicilor definite, setului de date i se va atribui un nume (**Incastrare**),
- click **OK**.

În fereastra din stânga, meniul **Treeview** va fi afișată rezemarea definită .



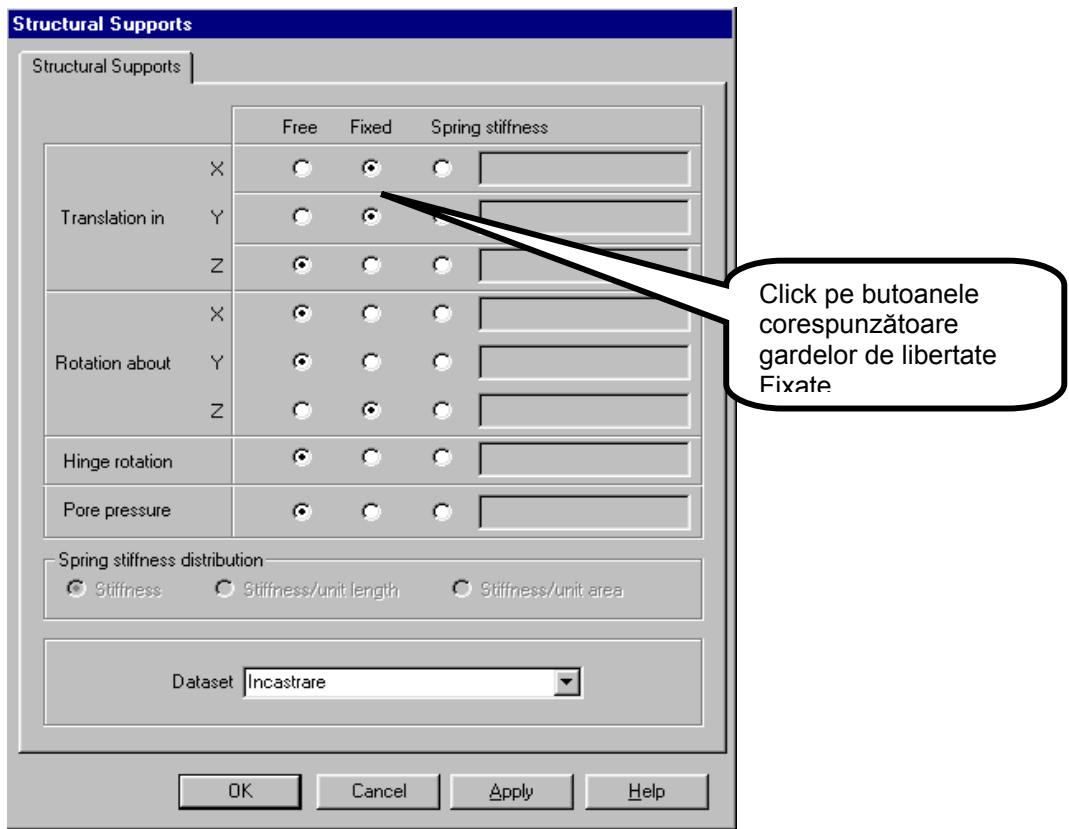


Figura 38

Parcurgând aceiași pași ca în cazul definerii rezemării tip încastrare se definesc condițiile de rezemare corespunzătoare reazemului articulat – vezi Figura 39.

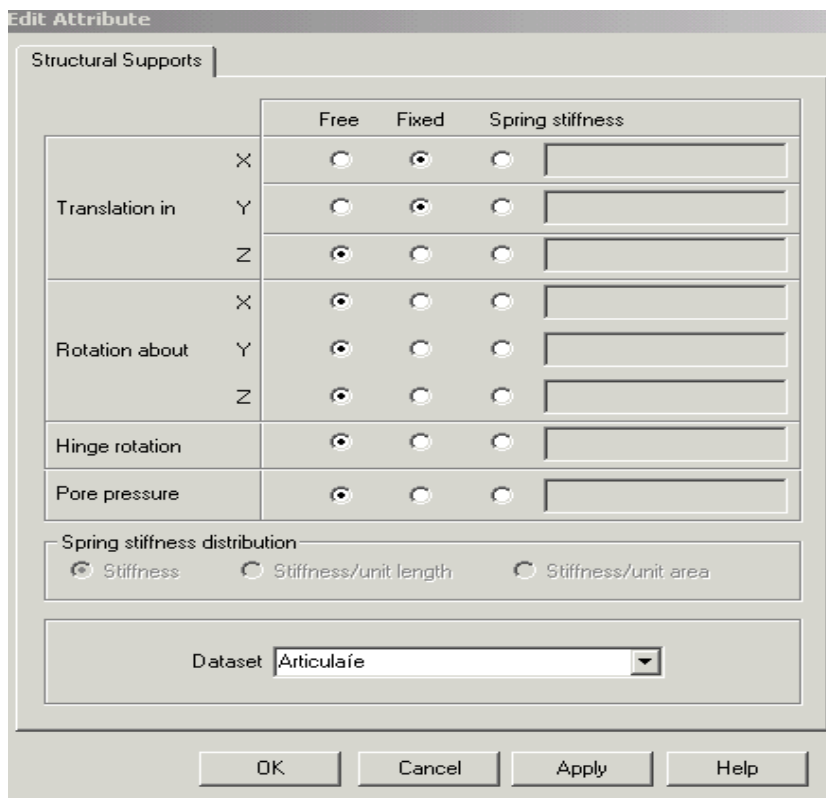


Figura 39.

b) Atribuirea condițiilor de rezemare

Cele două condiții de rezemare definite anterior vor fi atribuite punctelor de rezemare ale modelului structurii. De exemplu pentru a introduce în model reazemul articulat se parcurg următorii pași:

- se selectează punctul de rezemare de la baza stâlpilor înclinați prin click cu buton stânga mouse direct pe punct,
- se selectează rezemarea tip Articulație din fereastra din stânga, meniul **Tree view** apăsând butonul din stânga al mouse-ului,
- se ține apăsat butonul mouse-ului, se trage în zona selectată a modelului,
- se eliberează butonul mouse-ului,
- în caseta de dialog care apare pe ecran (Figura 40.) vă asigurați că rezemarea este atribuită punctului selectat,
- click **OK**, după care pe ecran va fi afișată rezemarea prin două săgeți care marchează deplasările împiedicate – vezi Figura 41.

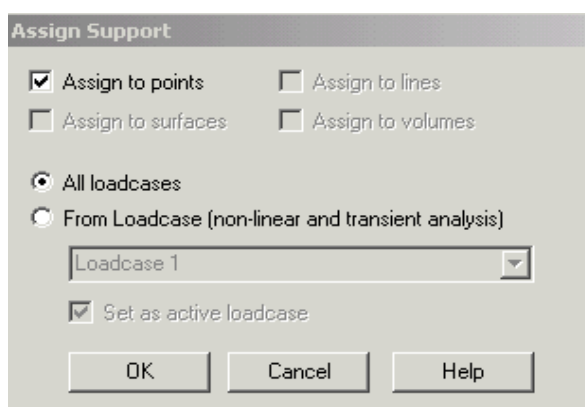


Figura 40.

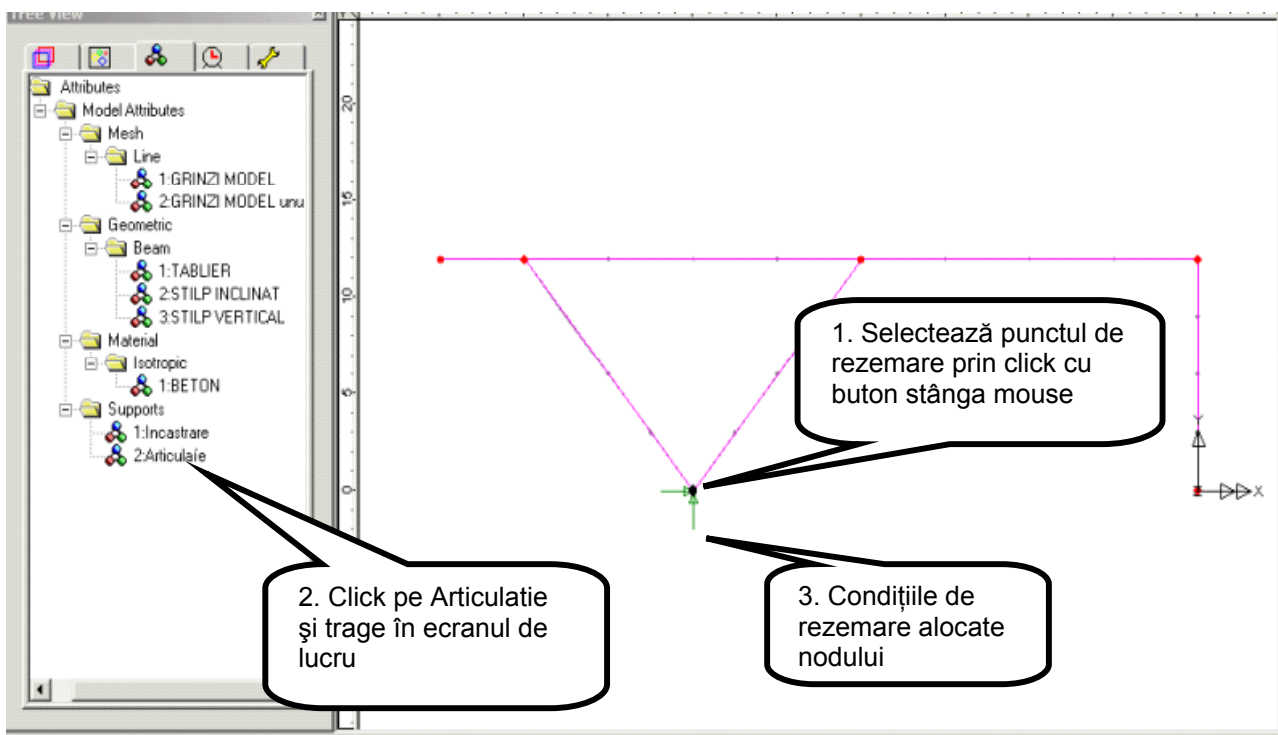


Figura 41.

Procedând similar se atribuie condițiile de rezemare tip încastrare nodului de pe stâlpul vertical – vezi Figura 42.

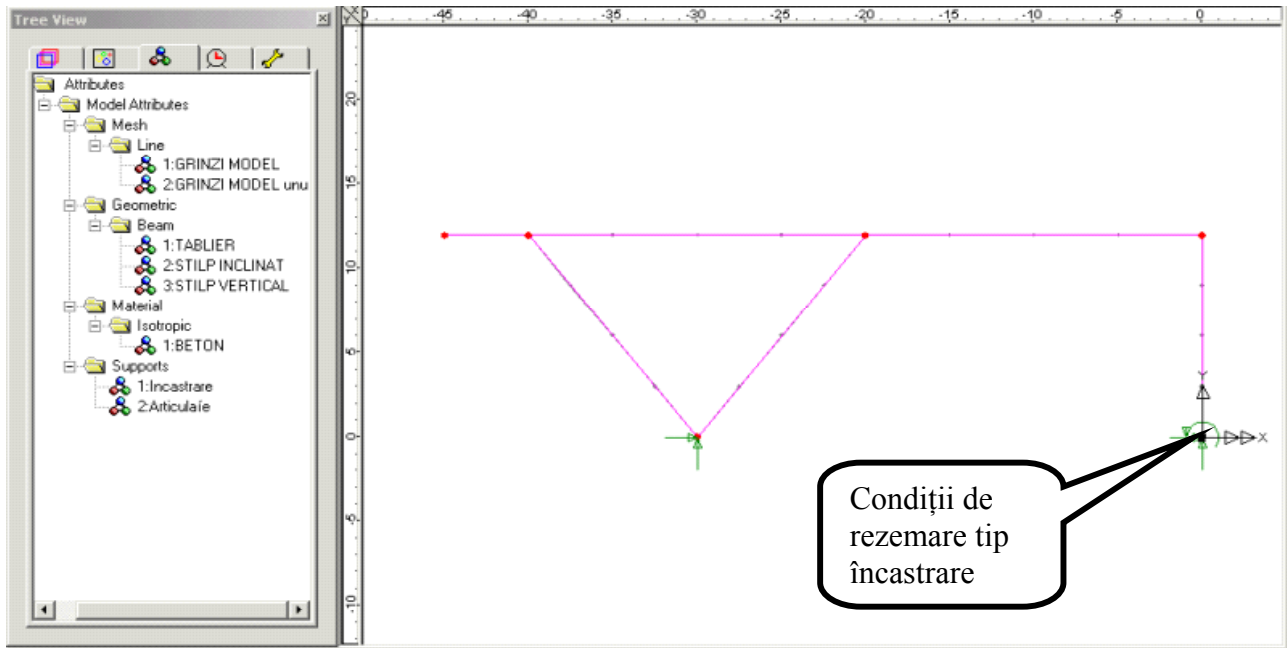


Figura 42.

Ipoteze de încărcare

Pentru analiza stabilității elastice a structurii se consideră o singură ipoteză de încărcare a structurii cu un sistem de forțe exterioare a căror valoare crește proporțional până la apariția fenomenului de pierdere a stabilității. În cazul prezentei analize sistemul de forțe exterioare constă în o forță uniform distribuită aplicată pe tablierul structurii. Valoarea inițială a încărcării este de 1 kN/m.

a) **Definirea încărcării** Încărcarea uniform distribuită este raportată la sistemul de axe local al elementelor de grindă. Pentru definirea acesteia se parcurg următorii pași:

- se deschide meniul **Attributes**,
- select opțiunea **Loading, Structural...** (Vezi Figura 43.)

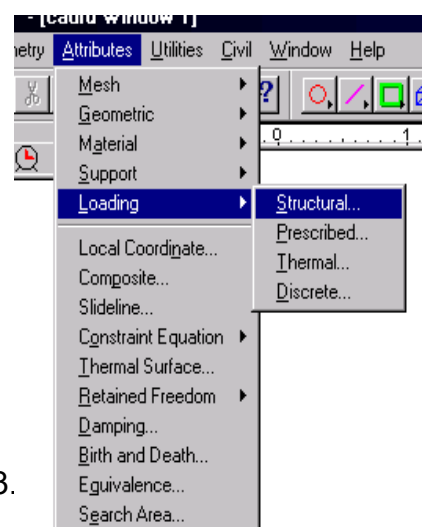


Figura 43.

- se deschide o casetă de dialog în care se selectează opțiunea **Local distributed**, vezi Figura 44.,

- în caseta de dialog se specifică intensitatea forței de **1kN/m** pe direcția axei locale **OY** și în sens invers acesteia,
- se atribuie setului de date numele **Forța distribuita**,
- click **OK**.

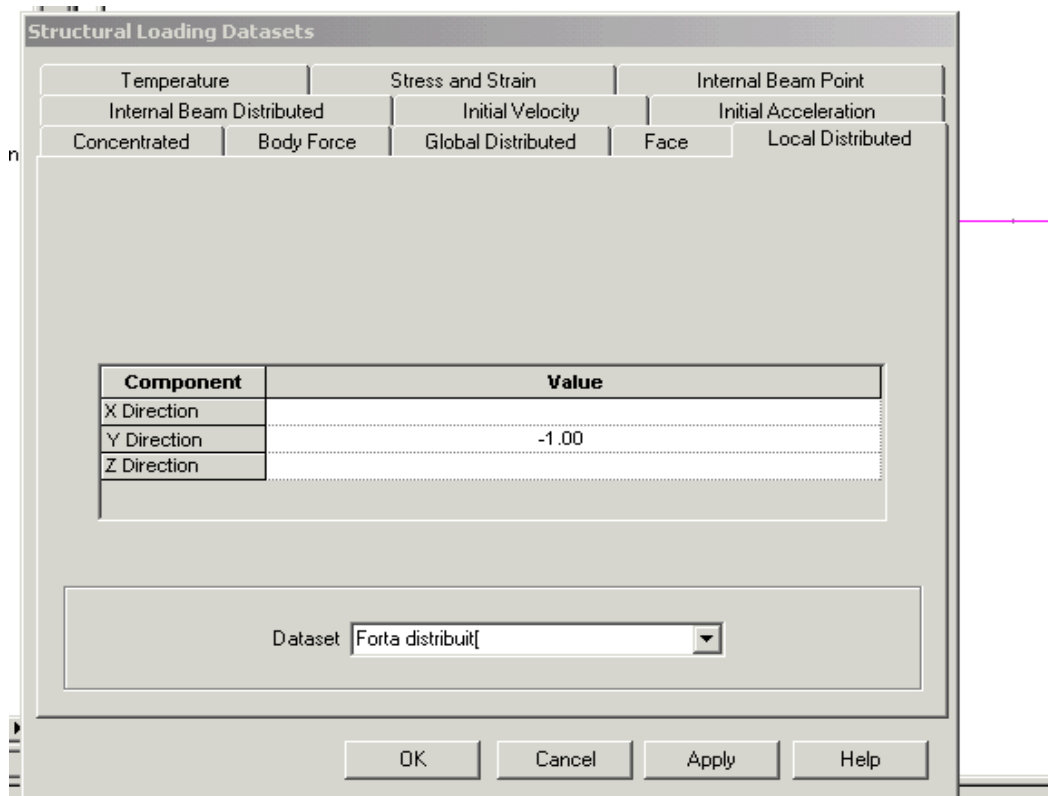


Figura 44.

În meniul din stânga ecranului de lucru **Tree View**, va fi afișat numele încărcării definite – vezi Figura 45.

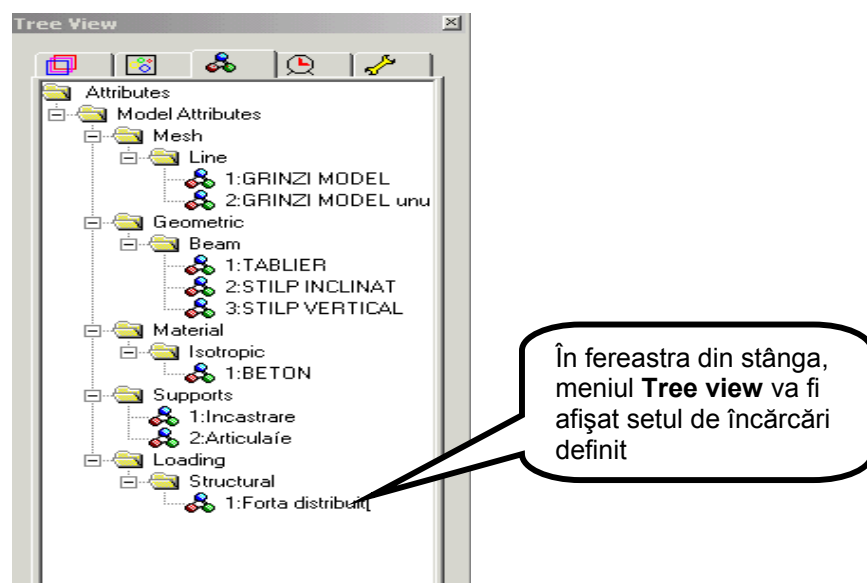


Figura 45.

b) Atribuirea încărcării

Pentru a atribui încărcarea definită elementelor tablierului se parcurg următorii pași:

- se selectează cu o fereastră grafică elementele tablierului,
- se selectează încărcarea **Forța distribuită** din fereastra din stânga, meniul **Tree view** apăsând butonul din stânga al mouse-ului,
- se ține apăsat butonul mouse-ului și se trage în zona selectată a modelului,
- se eliberează butonul mouse-ului,
- în caseta de dialog care apare pe ecran vă asigurați că încărcarea este atribuită unor linii în ipoteza de încărcare **1 (Loadcase 1)** și cu factorul **1** de multiplicare (Figura 46.),
- click **OK** și pe ecran sunt afișate forțele distribuite pe tablier – vezi Figura 47.

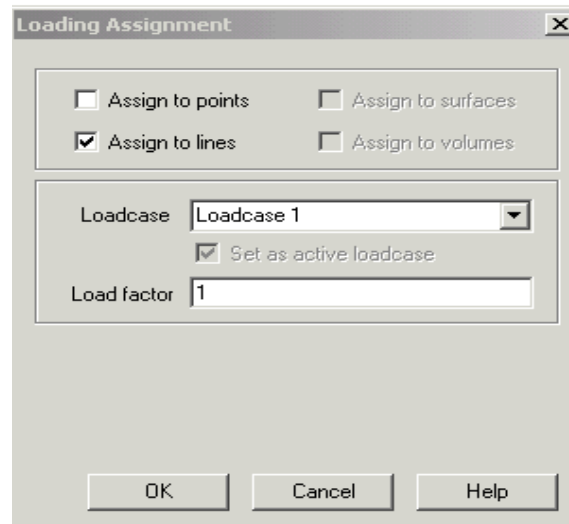


Figura 46.

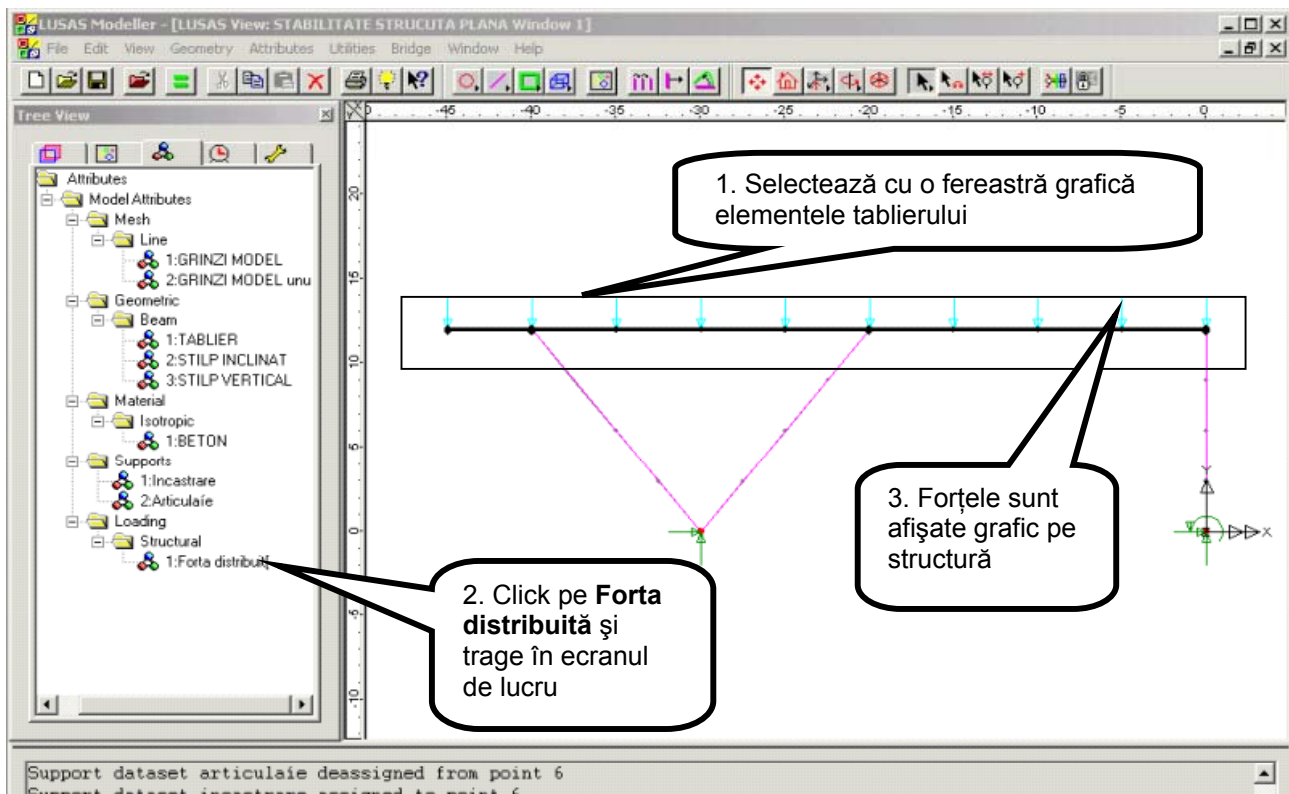


Figura 47.

Copierea modelului structurii în oglindă

Jumătatea din stânga a structurii este acum definită. Pentru a obține întregul model se poate apela la una din facilitățile programului - **copierea în oglindă** a elementelor cu toate atributele lor (mesh, caracteristicile materialelor, caracteristicile geometrice ale secțiunilor transversale, rezemări, încărcări).

Pentru a realiza operația de copiere în oglindă a modelului se parcurg pașii:

- a) se definește planul în raport cu care se copiază modelul existent în oglindă
- se selectează cele două puncte din axa de simetrie – Figura 48.,

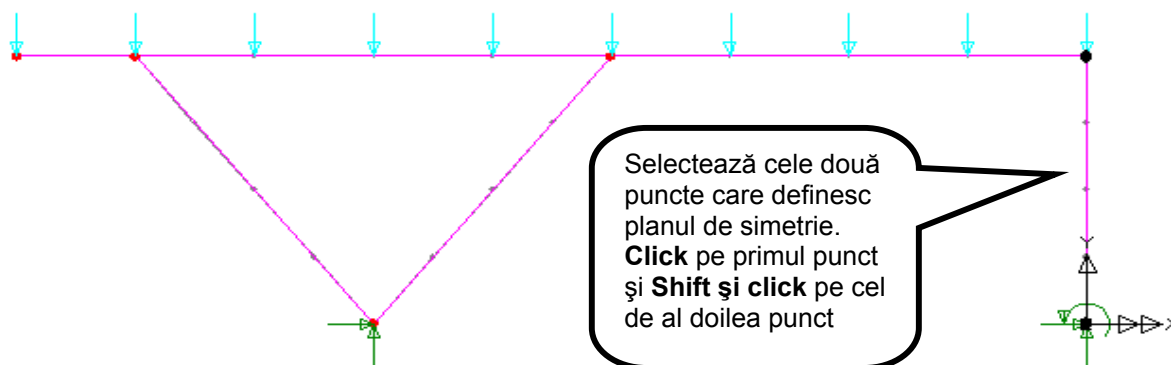




Figura 48.

- se deschide meniul **Edit** și se alege opțiunea **Selection Memory, Set** pentru a reține în memorie cele două puncte.

- b) se selectează cu ajutorul unei ferestre grafice tot modelul generat, 
- c) se copiază modelul selectat în oglindă direct prin apăsarea butonului 

- Se deschide o casetă de dialog în care se fac următoarele selecții – Figura 49.

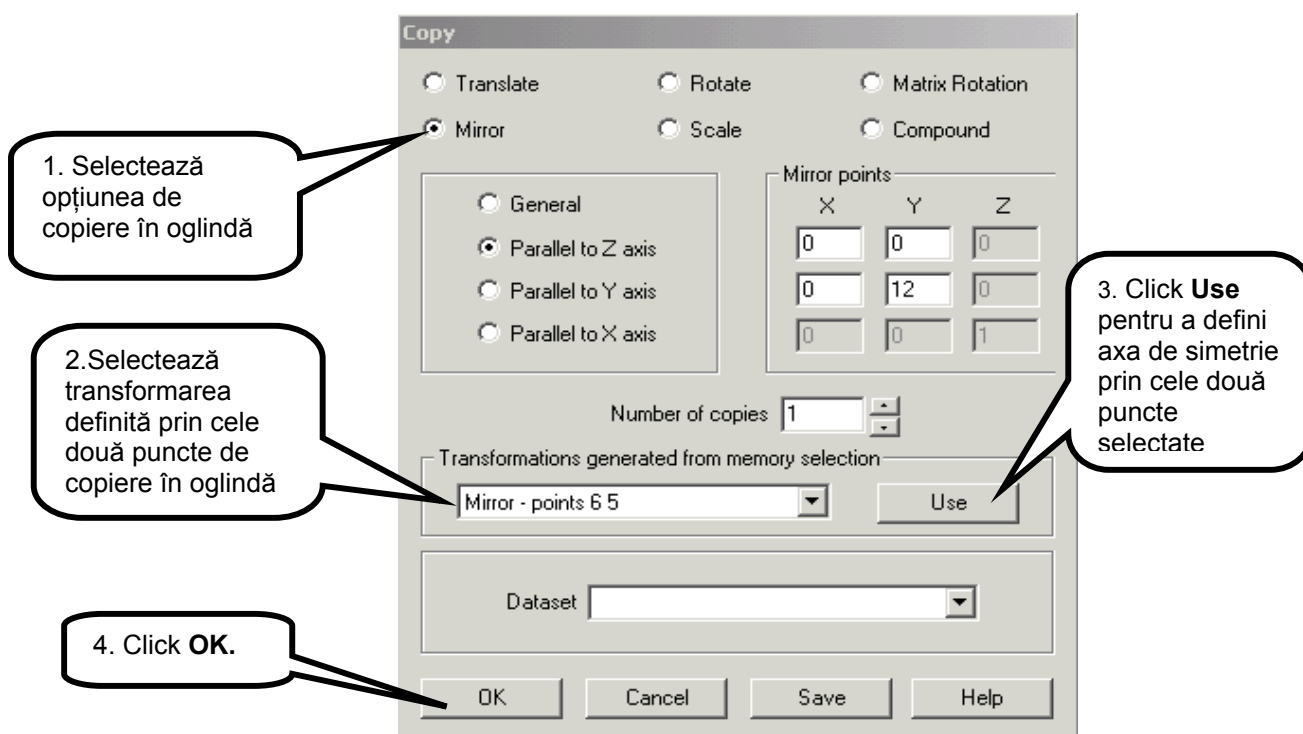


Figura 49.

Ca urmare a selectării opțiunilor de mai sus în fereastra de lucru se afișază întreaga structură cu toate atributele definite atașate elementelor acesteia – vezi Figura 50. Imaginea structurii cuprinde și sensurile liniilor afișate conform cu procedura descrisă la generarea liniilor modelului geometric.

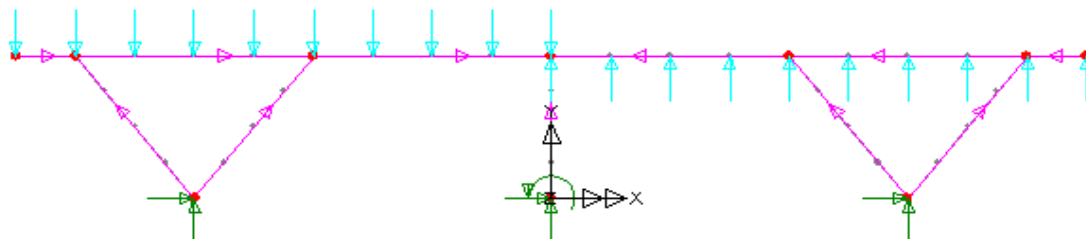


Figura 50.

Din analiza imaginii afișate se constată că prin operația de copiere în oglindă sensurile liniilor elementelor de tablier generate prin copiere sunt contrare sensurilor elementelor originale. În consecință, sensul sistemului local de axe este modificat, fapt remarcat prin schimbarea sensului încărcărilor distribuite pe elementele nou generate.

Pentru a păstra aceeași convenție a sensurilor liniilor modelului geometric și implicit a axelor locale ale elementelor, este necesar a schimba sensul liniilor tablierului generat prin copiere. Pentru această operație se parcurg următorii pași:

- se selectează cu o fereastră grafică liniile tablierului nou generat,
- se deschide meniul **Geometry**, opțiunea **Line**, comanda **Reverse**,
- pe ecran vor fi afișate liniile cu noile sensuri – vezi Figura 51.

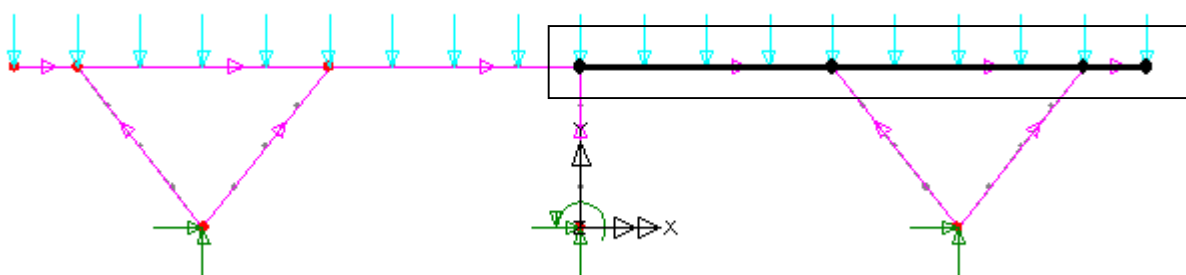


Figura 51.

O dată verificate sensurile liniilor modelului geometric, acestea pot fi eliminate de pe ecranul de lucru prin:

- click dublu în fereastra din stânga, meniul **Layers**, opțiunea **Geometry** – vezi Figura 52.,
- în caseta de dialog de-selecție opțiunea de afișare a sensului liniilor (**Show line directions**) – Figura 52.,
- click **OK**.

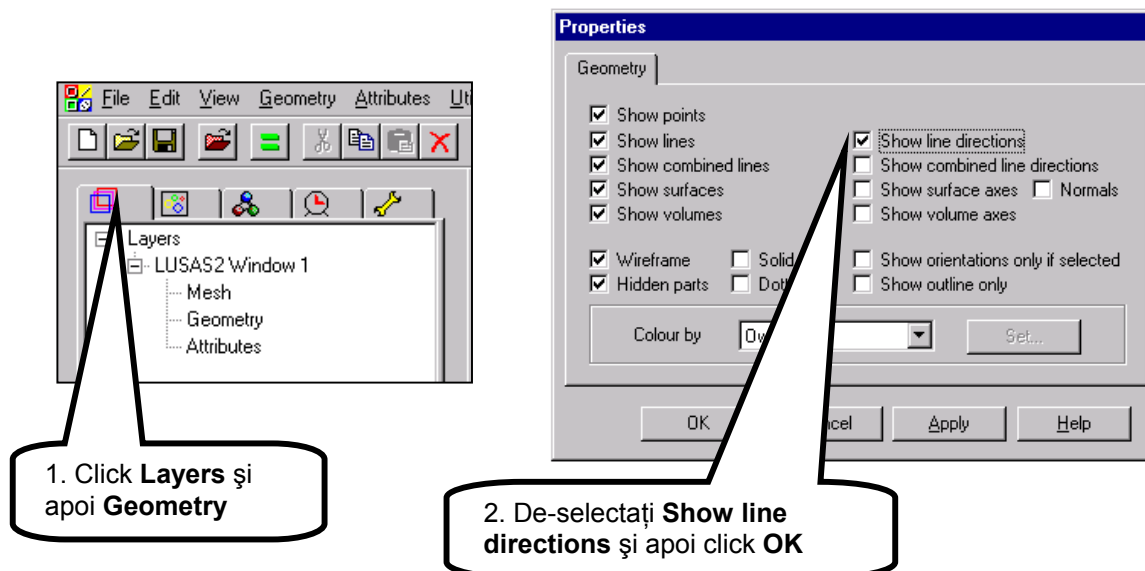


Figura 52.

Definirea tipului de analiză

În absența altor specificații programul de calcul efectuează automat o analiză statică liniară a structurii și oferă rezultate în deplasări și eforturi care pot fi afișate pe ecran sau salvate ca fișere cu rezultate numerice.

Prin prezenta analiză se solicită determinarea valorii încărcării pentru care structura își pierde stabilitatea echilibrului elastic. Pentru a preciza această opțiune de calcul se vor parcurge următoarele etape, descrise în Figura 53.:

- se selectează meniul **Load case** din meniul **Tree View** prin apăsarea butonului tip ceas,
- selectează caseta **Loadcase 1** și dublu click pe aceasta,
- se deschide o casetă de dialog în care se activează opțiunea **Eigenvalue** și apoi click pe butonul **Set**, care va deschide caseta de dialog din Figura 54.

În caseta de dialog intitulată **Eigenvalue** (valori proprii), se vor selecta următoarele opțiuni:

- **Solution** (tipul analizei) – selectează **Buckling load** (forța critică de falmbaj),
- **Number of eigenvalue** (număr de valori proprii) – **1**, întrucât interesează prima valoare proprie (cea mai mică),
- Click **OK**, urmată de **OK** pentru a închide caseta de dialog aferentă la **Loadcase1**.

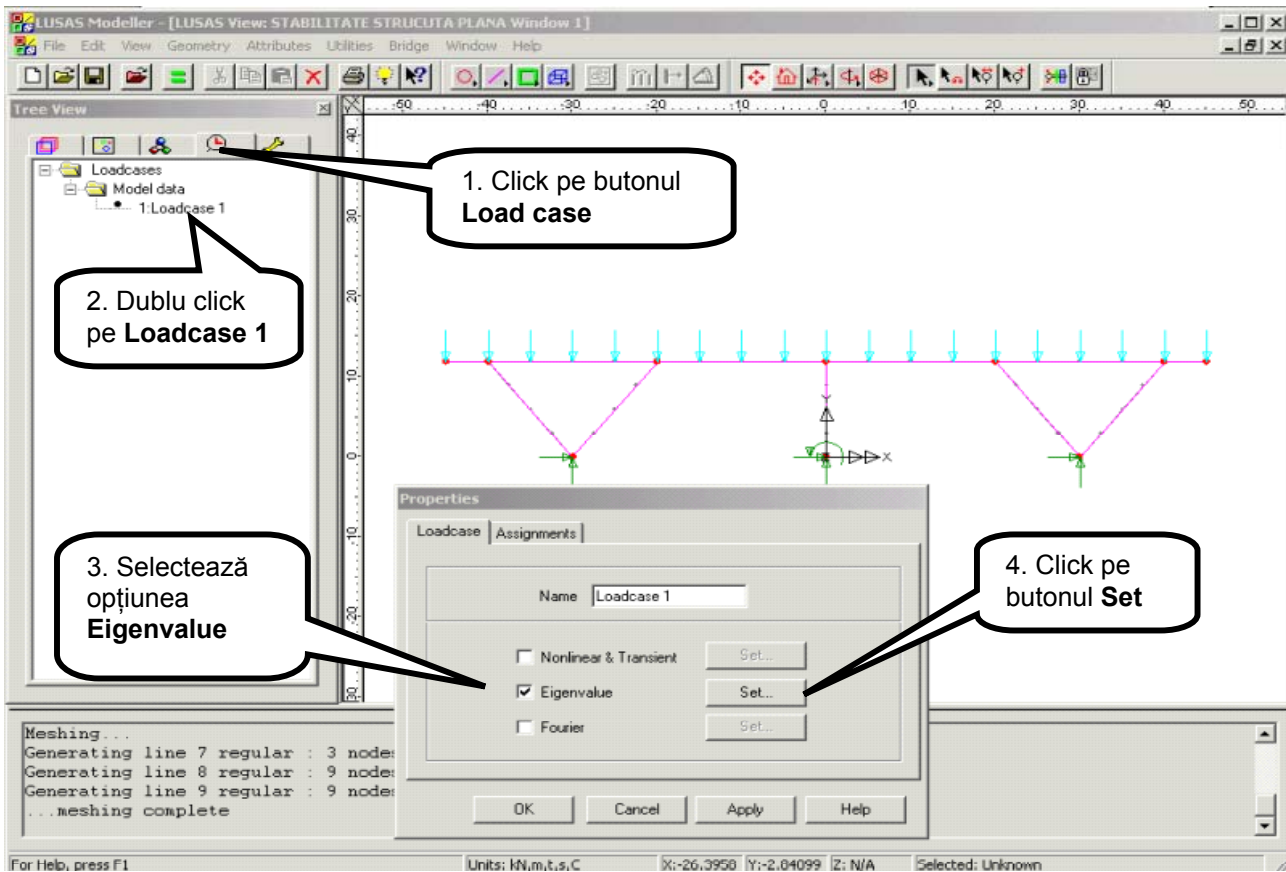


Figura 53.

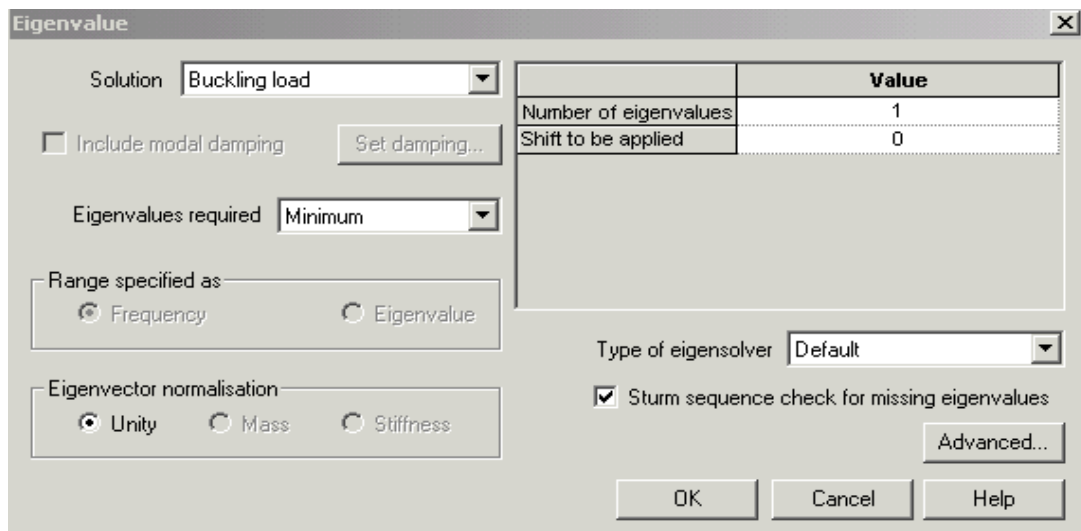


Figura 54.

Salvare fișiere model și date. Efectuarea analizei

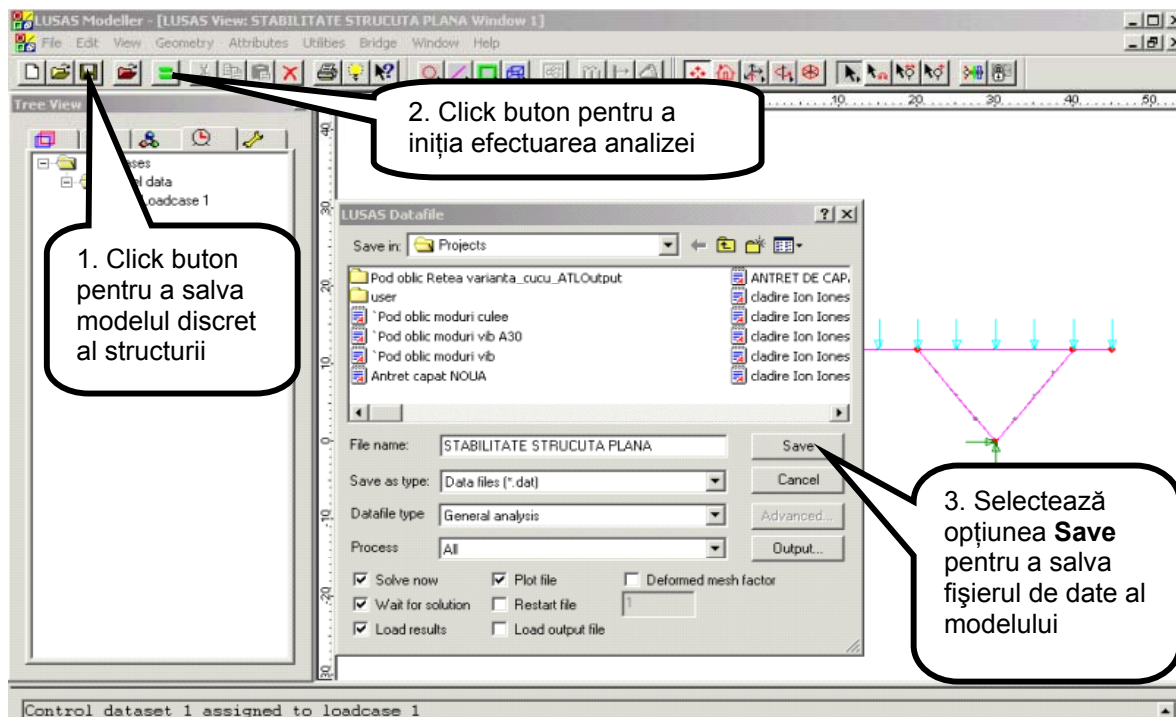


Figura 55.

Modelul discret al structurii este pregătit pentru efectuarea analizei stabilității echilibrului elastic. Urmând pașii prezentați în Figura 55., programul de calcul va realiza analiza solicitată. Pe ecranul calculatorului se va deschide o fereastră în care se pot urmări etapele de calcul ale analizei, care se va închide automat la terminarea acesteia. Timpul de evaluare a valorii forței critice este de 1-2 minute, funcție de configurația calculatorului.

Vizualizarea rezultatelor

Pentru analiza stabilității echilibrului elastic prin bifurcare sunt importante două caracteristici: factorul critic și forma deformată corespunzătoare acestuia. Ambele caracteristici se obțin prin rezolvarea unei probleme de valori și vectori proprii.

a) Factorul critic

În analiza flambajului structurii prin bifurcare factorul critic este chiar prima valoare proprie calculată. Valorile proprii sunt afișate într-o fereastră text, parcurgând următorii pași:

- selectează cu butonul stânga al mouse-ului meniul **Utilities** și din acesta opțiunea **Print results wizard.....**, prin care se deschide o fereastră de dialog – Figura 56.,
- în fereastra de dialog se apasă butonul **Finish**,
- rezultatele analizei sunt prezentate într-o fereastră text – Figura 57.

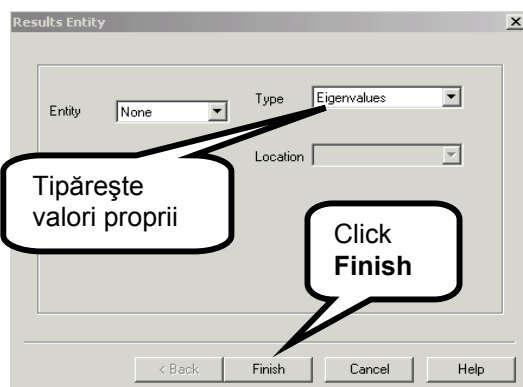


Figura 56.

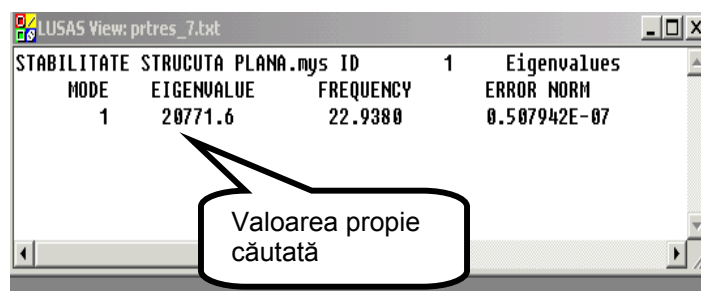


Figura 57.

Pentru a obține valoarea încărcării care produce flambajul structurii se multiplică valoarea încărcării aplicată pe structură (1kN/m) cu factorul critic (20771,6), rezultând 20771,6 kN/m.

b) Forma proprie de pierdere a stabilității

Forma deformată a structurii corespunzătoare primului mod de pierdere a stabilității este normalizată în raport cu cea mai mare valoare dintre componentele deplasării în raport cu sistemul de axe global. În cazul prezentei analize deplasarea maximă se înregistrează la capetele consolelor pe direcție verticală.

Pentru a vizualiza pe ecran forma deformată a structurii, se parcurg următorii pași:

- se apasă butonul dreapta al mouse-ului în fereastra de grafică, în afara modelului,
- ca rezultat al acestei operații se deschide un meniu cu opțiuni dintre care se selectează opțiunea **Deformed mesh....** – vezi Figura 58.,
- pe ecran se afișază forma deformată a structurii și o casetă de dialog care permite modificarea scării de reprezentare sau a culorii utilizate la trasarea deformatei – vezi Figura 59.,
- click **Close** pentru a închide fereastra de dialog.

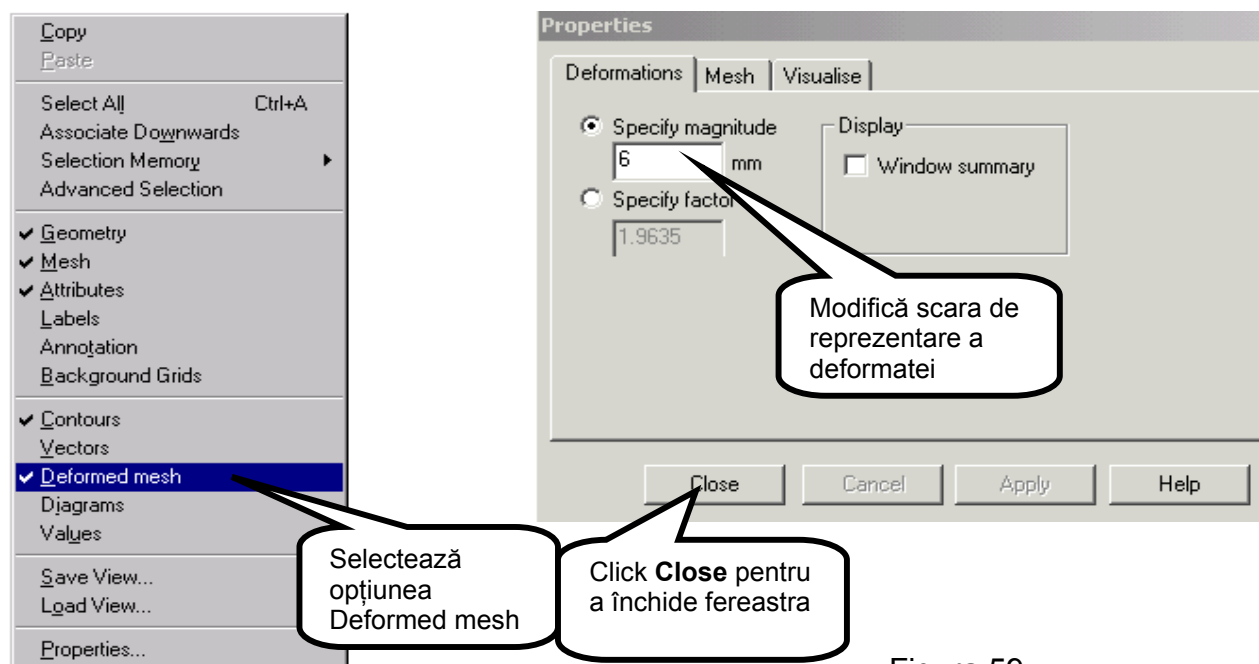


Figura 58.

Figura 59.

Forma deformată a structurii corespunzătoare primului mod de pierdere a stabilității este prezentată în Figura 60.

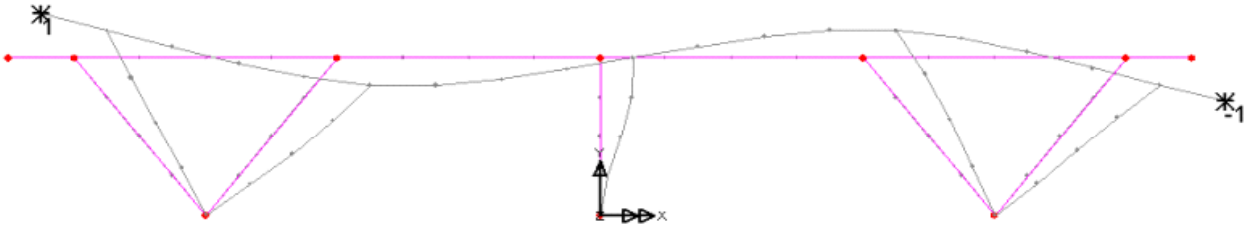


Figura 60.